

# 切削工具の境界摩耗に関する研究 (第1報)

藤田 武男\*

## Study on Groove Wear of Cutting Tool (1st Report)

Takeo FUJITA\*

### Abstract

Cutting tests are made with carbide tool, to investigate the groove wear on boundary portion of cutting tool which the reason of groove formation is not clear and there will be many informations on state of machining. From the experiments, following results are obtained.

- 1) In machining of carbon steel S55C, the groove wears are mainly caused by action of mechanical friction between tool material and workpiece at boundary portion. Therefore, the shape of groove wear is sharp and long.
- 2) In machining of stainless steel SUS304, the groove wears are mainly caused by adhesive action between tool material and workpiece at boundary portion. Therefore, the shape of groove wears are deep and short, and the chipping of tool at boundary portion often causes due to adhesive action in dry condition. However, the chipping of tool at boundary portion does not cause under existence of cutting oils.
- 3) Groove formations are different between in machining using tool of positive rake angle and negative rake angle.

### 1 緒言

切削工具の境界摩耗は横切刃上及び前切刃上の両境界部に生じる溝状の異状摩耗のことである。この境界摩耗に関する研究はにげ面摩耗(フランク摩耗)などに比較して少なくその生成要因など不明確な点が多い、境界摩耗の生成要因としては種々考えられている。たとえば被削材の加工硬化<sup>(1),(2)</sup>及び被削材のかえり<sup>(3)</sup>、工具材の酸化<sup>(4),(5)</sup>、境界部における応力集中<sup>(6)</sup>などがあげられる。これらの要因は互いに関連し合っていて一種類の要因で説明することは出来ないと思われる。切削条件や切削環境の変化及び工具と被削材との組合せによっていずれかの要因が支配的になるものと推察される。実際、切削条件を変えあるいは被削材を変えて実験を行なうと境界摩耗が著しく生じたりあるいは生じなかったりその変化の程度が著しい。このことは逆に、境界摩耗は切削中の状態の変化をよく表現しているものと考えられる。著者は境界摩耗が切削現象における価値ある情報、たとえば被削性の判別あるいはビビリ

\*工業短期大学部 機械工学科

現象に対するもの等を有しているものと考え総合的に研究を行っている。今回は切削条件、被削材及び工具の形状を変えた場合また油削を使用した場合に境界摩耗がいかなる形態を示すかについて検討した。

### 2 実験方法

使用工具材は主として超硬合金 P 20 を使用した。工具は、すくい角が負の場合、SNG 431 タイプのスローアウェイチップを用い、そのときの工具刃先形状は(−5°, −5°, 5°, 5°, 15°, 15°, 0.4mm)である。すくい角が正の場合は SPG 421 タイプのチップを用いそのときの工具刃先形状は(5°, 0°, 6°, 11°, 15°, 15°, 0.4mm)である。切削条件は次に示すように広範囲にわたって変化させた。

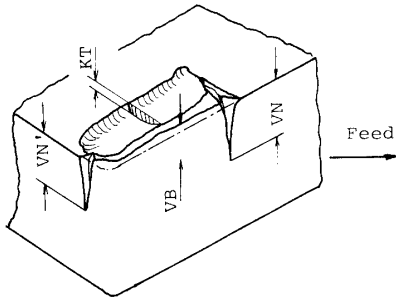
切削速度  $V=20\sim 300\text{m/min}$

送り  $f=0.05\sim 0.5\text{mm/rev}$

切り込み  $d=0.5\text{mm}\sim 2\text{mm}$

実験は旋削で行ない、使用旋盤は昌運カズヌーブ HB-500X 形である。被削材は炭素鋼 S55C (HB=210)とステンレス鋼 SUS304 (HB=181)を用い、いずれも直径

100mm 長さ 300mm のものを直径が 60mm になるまで  
 長手旋削を行った。又使用切削油剤はユシロンオイル  
 CS(油性形, JIS1-2)を 3l/min の割合で切削部上方よ  
 り注油した。Fig. 1 に工具の損傷形態を示し、各損傷  
 を Fig. 1 のように定義する。



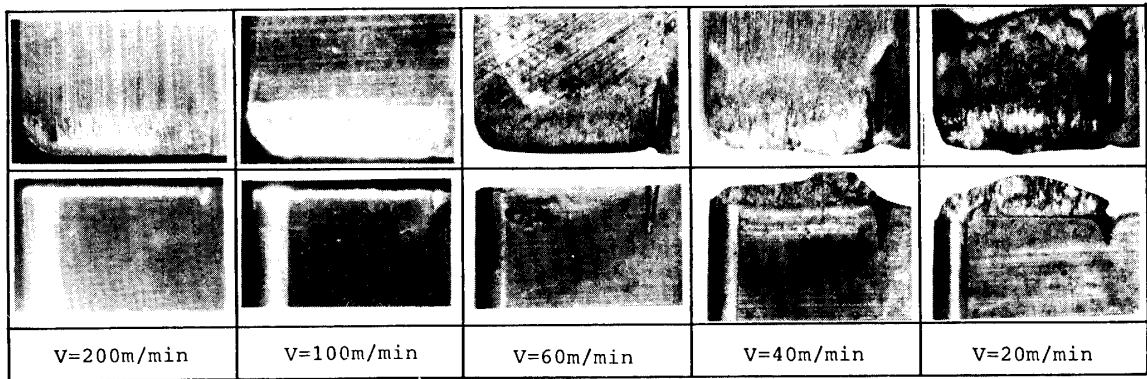
VB: Flank wear  
 VN: Groove wear on side cutting edge  
 VN' : Groove wear on end cutting edge  
 KT: Depth of crater wear

Fig.1 Tool wear type

3 実験結果と考察

3.1 切削条件の影響

主として炭素鋼 S55C について切削条件と境界摩耗  
 の関係について調べた。Fig. 2 は切削速度を変えた場



Feed: 0.1mm/rev, Depth of cut: 1.5mm, Tool material: P20  
 Work material: S55C, Cutting length: 2000m, Tool rake angle: negative

Fig.2 Relations between cutting speed and tool wears

合の工具の損傷状態を示している。これより切削速度  
 が変われば工具の損傷形態が著しく異なることがわか  
 る。たとえば構成刃先の生じる低速領域においては比  
 較的横幅の広い横にげ面境界摩耗 VN が生じる、一方  
 200m/min 程度の高速領域になると長さの短い境界  
 摩耗になる、フランク摩耗 VB は高速になるにしたが  
 い増大の傾向を示す。中間的な速度たとえば切削速度  
 V=60m/min では構成刃先はほぼ消滅し鋭利な横にげ  
 面境界摩耗及びすくい面境界摩耗が生じる。このよう  
 に長い鋭利な境界摩耗がにげ面とすくい面の両面にわ

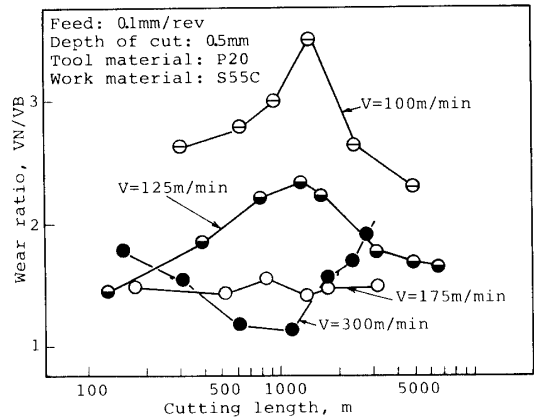


Fig.3 Variation of VN/VB with the progress of cut

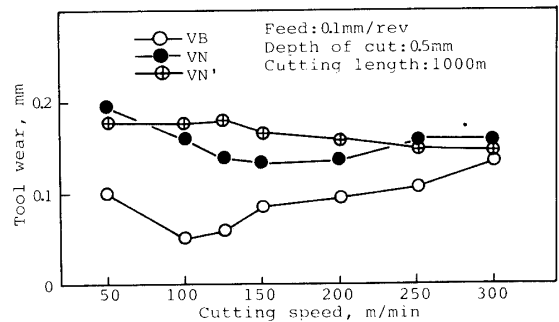


Fig.4 Relations between tool wears and cutting speed

たって生じることは工具が被削材及び切りくずとなめ  
 らかで安定した接触状態にあるためと考えられる。次  
 にフランク摩耗との関係について観察してみる、低速  
 領域では VB に対して VN が著しく成長しているが、  
 高速になると両者の値が接近してくる。Fig. 3 は Fig.  
 2 の場合と切削条件は異なるが VN と VB の値の比を  
 とって各速度ごとに示したものである。これからわか  
 るように、VN/VB の値は低速になるにしたがい大き  
 く又切削が進行するにしたがい増大している、しかし  
 ある程度切削が進行すると逆に減少の傾向を示す。こ

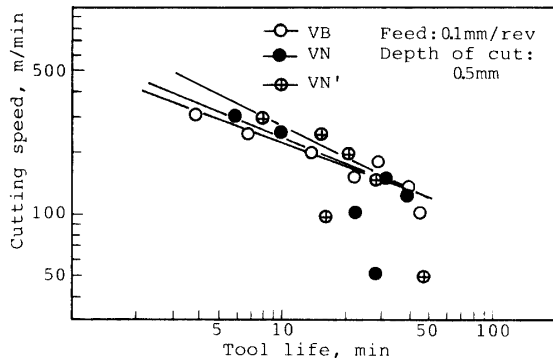


Fig.5 Comparison of tool life curve under various kinds of tool wears.

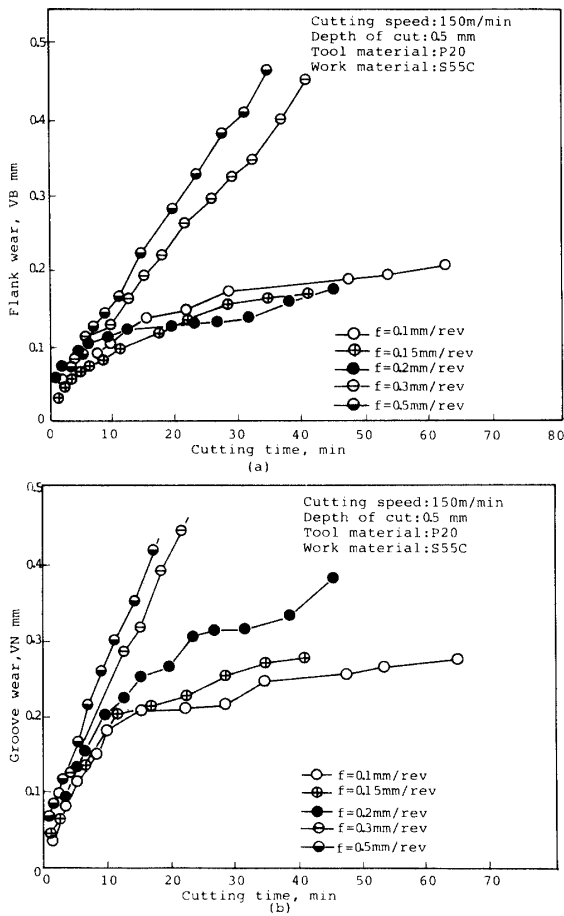


Fig.6 Influences of feed rate on tool wears

のことは切削の初期ではVBの進行に対してVNの進行の方が急速であり、ある程度進行すると逆にVBの進行の方が速くなることを示している。VN/VBの値がとくに低速において大きくなる理由は構成刃先の生成によって境界摩擦VNが増大し易くなるのに対し、低速であるため切削温度が低く又構成刃先によるフランク摩耗の保護作用などによりVBの進行が遅れるためと考えられる。Fig. 4に切削距離L=1000mにおける各種工具損傷を比較して示した。フランク摩耗VBは

切削速度の増大につれてわずかではあるが増大の傾向を示している。一方前にげ面境界摩擦VN'及び横にげ面境界摩擦VNはむしろ減少の傾向を示す。VN'及びVNのような切削速度すなわち切削温度の増大につれてむしろ値が減少することは、VN'及びVNの生成要因として熱による影響は少ないものと考えられる。それに対しフランク摩耗は比較的熱の影響を受けやすいといえる。Fig. 5はフランク摩耗VB、横にげ面境界摩擦VN及び前にげ面境界摩擦VN'それぞれを摩耗基準として示した寿命曲線である。寿命判定基準はVBの場合0.15mm VN及びVN'の場合は0.25mmとしている。Fig. 5の三者において曲線の傾きに相異が見られる、すなわちVBを基準とした場合が最もゆるやかであり、VN'を基準とした場合が最も急勾配になっている。この傾向は送り量及び切り込み量を変えた場合においても同様に認められた。従来、高速度鋼工具のように切削熱が主原因となって摩耗し易い工具の寿命曲線は曲線の傾きがゆるやかであるのに対し、セラミックや超合金などのようにチッピングなどが原因となって摩耗し易い工具の寿命曲線は傾きが急になることが知られている。このことから判断できることは、境界摩擦はフランク摩耗に比較して熱的要因でなく機械的な摩擦及びチッピングなどが直接の原因であると推察される。前述のように境界摩擦の生成要因として種々考えられているが上記の事実から考え、前にげ面上の境界摩擦VN'は前加工により加工硬化した被削材が工具を擦過してぬくことにより生じ<sup>(1)</sup>、横にげ面境界摩擦VNは切り込み端部の被削材のかえり等が工具の境界部を擦過してゆくためと推察される。もちろん構成刃先が生じる場合はその生成及び脱落の状態が境界摩擦に影響を及ぼし又アルゴンガスを噴射すると境界摩擦が抑制<sup>(5),(7)</sup>され、酸素ガスを噴射すると境界摩擦が増大することから竹山らが述べている<sup>(4)</sup>酸化による工具材の耐摩耗性の低下なども当然影響を及ぼしているが直接的には前述の要因によるものと考えられる。Fig. 6(a), (b)に送り量変えた場合のフランク摩耗VB及び横境界摩擦VNを示した。これからVB, VNとも送り量が増大する程より損傷が大きくなることがわかる。とくに横にげ面の境界摩擦は送り量が増大する程みぞの横幅が広がる形状を示した。これは送りの増大に伴いとくに送り方向の切削力の増大及び被削材のかえり量<sup>(8)</sup>が増大したことが原因しているものと考えられる。又切り込み量dを変えた実験においてd=0.5mmと小さな切り込み量及びd=2mmと大きい切り込みの場合で境界摩擦はむしろ小さく、中間のd=1mm及び1.5mmの場合で増加する傾向が認められた。この傾向は送り量を

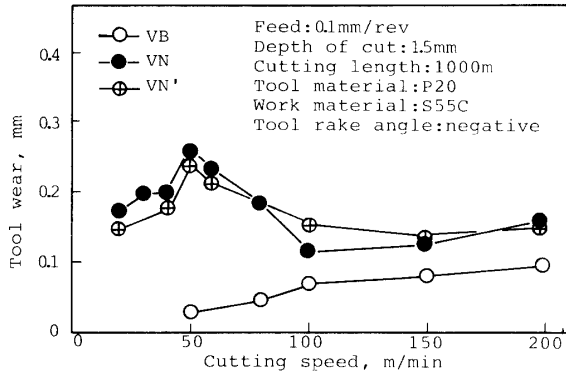


Fig.7 Relations between tool wear and cutting speed.

3.2 構成刃先との関連

境界摩耗が生成する直接の原因としては前述のように横にげ面上においては被削材のかえり又すくい面上においてはきりくず端面による擦過であると述べた。しかし構成刃先が生じる場合、構成刃先が境界摩耗に対してどのような影響を及ぼすか検討する必要がある。周知のように、構成刃先は高い硬さを有しているため境界摩耗を促進させるものと推察される。Fig. 7 に炭素鋼 S55C をすくい角負の工具で乾式切削した場合の各種工具損傷を切削速度ごとに比較して示した。V = 50m/min 以上の速度領域では各種摩耗とも Fig. 4 の場合と同様の傾向を示していることがわかる。しかし V =

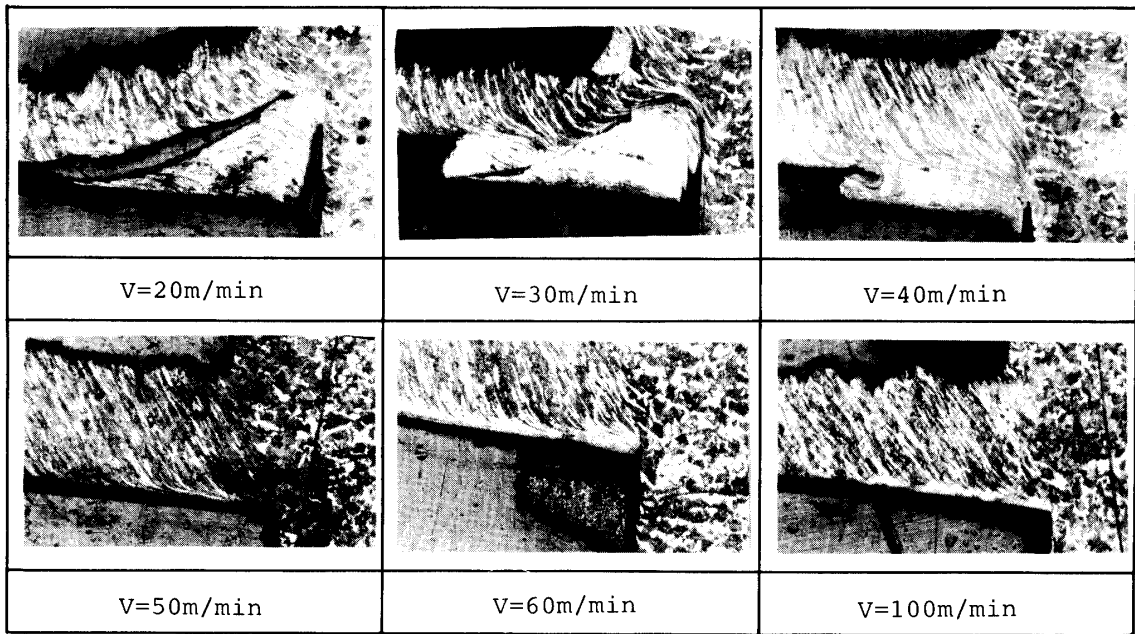


Fig.8 Behaviors of built-up-edge during cutting.

Feed: 0.2mm/rev, Depth of cut: 1.5mm, Tool material: P20  
Work material: S55C, Tool rake angle: negative

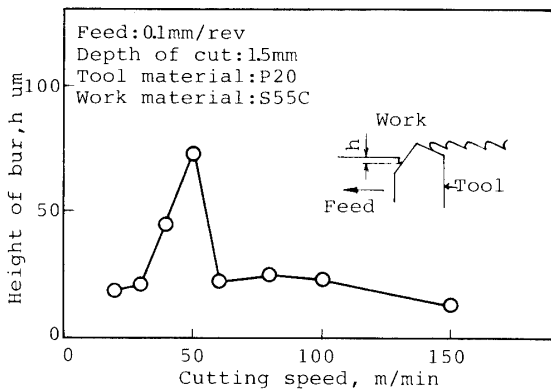


Fig.9 Relation between cutting speed and height of burr.

変えた場合でも同一の傾向が見られた。このことは工具と被削材及び切りくずとの接触の状態に関連しているものと推察される。

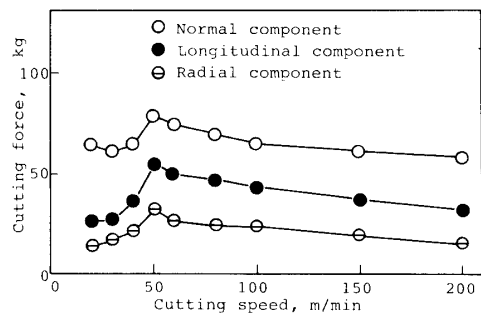
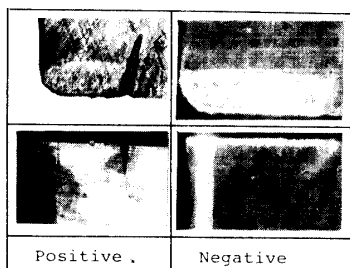


Fig.10 Effects of cutting speed on cutting force.

50m/min 以下の低速において興味ある傾向を示している、一般に境界摩耗 VN, VN' は構成刃先の生じる場合

の方が生じない場合より大であるが、大きな構成刃先の生じる  $V=20$  及び  $30\text{m/min}$  での境界摩耗の方が小さな構成刃先の生じる  $V=50\text{m/min}$  に比較して低い値を示していることである。Fig. 8 は瞬間停止法により切削中の構成刃先の状態を観察した写真である。 $V=20\text{m/min}$  ではくさび形の  $V=30\text{m/min}$  ではノーズ形のいずれも背の高い構成刃先が生じているが  $V=50\text{m/min}$  では消滅しかけている。このように大きい構成刃先が生じる場合が小さな構成刃先の生じる場合より境界摩耗が大きくなるのは、工具の形状などが関連して切削力の状態及び構成刃先の脱落の形態に相異があるものと考えられる。後述するがすくい角が正の場合では大きい構成刃先が生じる場合の方が境界摩耗は大である。そこで被削材のかえり状況を調べてみた。かえり高さは瞬間的に工具を離脱させた後あらき計にて測定した。Fig. 9 はそのときの値を示したグラフである、これらの各点は10回測定した平均の値を示している。切削速度  $V=50\text{m/min}$  においてかえり高さが最も高くなっており境界摩耗が最も大きくなる場合と一致している。被削材のかえりは送り量あるいは切り込量が增大しいわゆる重切削になる程生じやすいと云われているが、本実験の場合のように切削速度が変わった場合でも異なることがわかった。Fig. 10 に切削速度による切削力の変化を示す、丁度  $V=50\text{m/min}$  で最大の値を示している、このことが  $V=50\text{m/min}$  で被削材のかえりが大きくなる原因であろうと推察される。切削速度  $V=50\text{m/min}$  で切削力が増大することは構成刃先が消滅して見かけのすくい角が減少したこと強く影響されているが、炭素鋼特有の青熱脆性にも関連しているものと考えられる。又低速度領域での上記の傾向は同一の工具形状を有する高速度鋼の場合も認められた。



Cutting speed:  $100\text{m/min}$ , Cutting time: 20min, Feed:  $0.1\text{mm/rev}$ , Depth of cut:  $1\text{mm}$  (positive), Depth of cut:  $1.5\text{mm}$  (negative)

Fig.11 Comparison of tool wears between positive rake angle and negative rake angle.

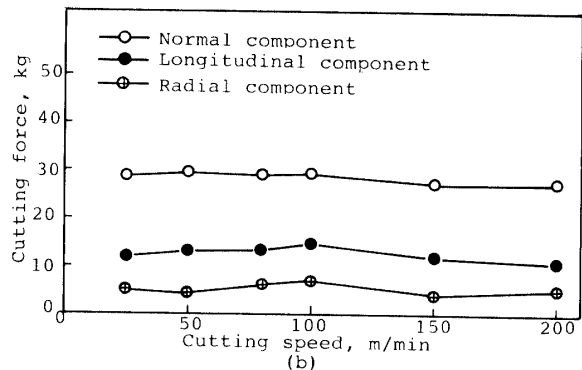
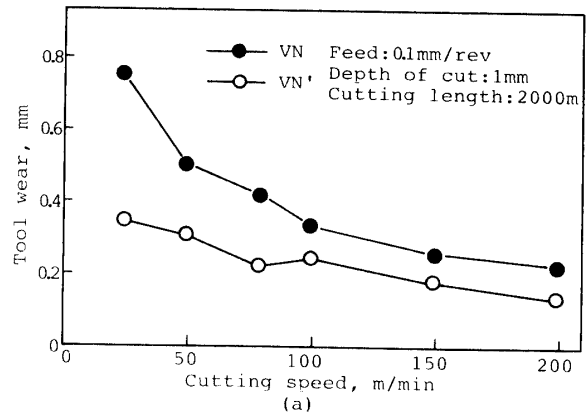


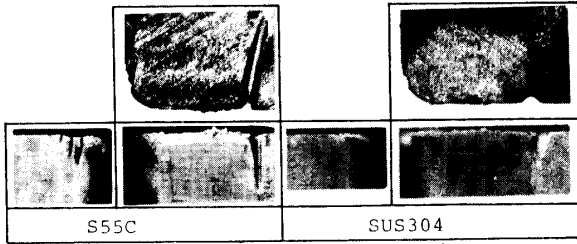
Fig.12 Tool wear and cutting force in cutting with tool of positive rake angle

高速度鋼の場合は  $V=40\text{m/min}$  で境界摩耗、切削力及びかえり高さが最大値を示した。

### 3.3 工具の形状と境界摩耗

工具の形状が異なると切削の状態が変化するため境界摩耗も変化するものと考えられる。たとえば横切刃角を変えるととくにその変化が大であることが知られている<sup>(9)</sup>。今回はとくにすくい角を違えた場合について検討した。Fig. 11 にすくい角が正と負の場合の工具の損傷写真を示した。両者において切り込み量に違いはあるが、正の場合工具のにげ面及びすくい面の両面にわたって長さの長いすくい面の境界摩耗が生じているが、負のすくい角の場合は比較的すくい面の境界摩耗が生じにくいようである。これは正のすくい角の場合は切りくずの長れがなめらかである一方、負の場合では切りくずの変形が著しく切りくずと工具すくい面との接触が変動的であるためと推察される。Fig. 12 (a), (b) にすくい角正で切削した場合の工具損傷及び切削力を示した、これより切削力はすくい角が負の場合と異なり、切削速度が増大しても大きな変化もなくなめらかな状態である、したがってかえり高さも切削速度の相異により変動が見られなかった。又境界摩耗についても、負のすくい角の場合と異なり、低速で構成刃先が顕著に生じる程大きな摩耗を示している。瞬間停止により、

正のすくい角で切削した場合の構成刃先を観察したところ、切削速度  $V=80\text{m/min}$  で構成刃先はほぼ消滅し、 $V=50\text{m/min}$  までは背の高い構成刃先が生じていた。以上のことから、正のすくい角の場合は、もともと切削がなめらかであり、構成刃先の生成により見かけのすくい角が増大しても切削力にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。



Cutting speed: 80m/min, Feed: 0.1mm/rev, Depth of cut: 1mm, Cutting time: 40min, Tool rake angle: positive

Fig.13 Comparison of tool wears in cutting of SUS304 and S55C.

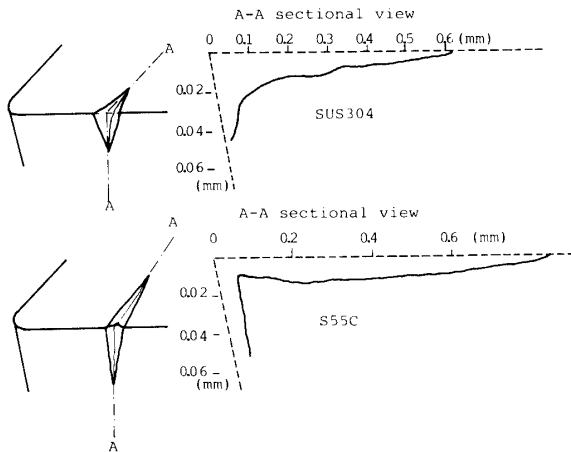
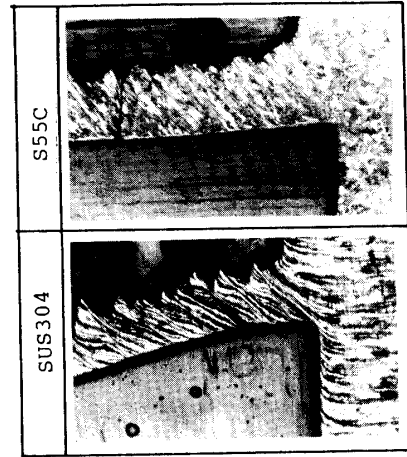


Fig.14 Comparison of groove wear on side cutting edge between cutting of SUS304 and S55C.

### 3.4 被削材と境界摩耗

被削材が異なれば、境界摩耗の生成状況が異なるものと考えられる。Fig. 13は炭素鋼 S55C とステンレス鋼 SUS304 を切削した場合の工具の損傷写真である。炭素鋼の場合は横幅がせまくて長い鋭利な境界摩耗を示し、前にげ面境界摩耗 VN も明確に生じている。それに対しステンレス鋼の場合は横幅が広く長さの短い形状を示し、前にげ面境界摩耗は炭素鋼の場合のように明確に生じない。Fig. 14 は横にげ面境界摩耗底部の状態を S55C と SUS304 の場合で比較して示した図である。これからわかるように、SUS304 の場合は切刃先端より斜めに欠け落ちるように深く摩耗が進行しているが、S55C の場合はみぞ底部の先はしっかりとしており、細長く摩耗が進行している。このような両者の摩



Cutting speed: 200m/min, Feed: 0.1mm/rev, Depth of cut: 1mm, Tool material: P20, Tool rake angle: positive

Fig.15 Comparison of cutting behaviors during cutting of SUS304 and S55C.

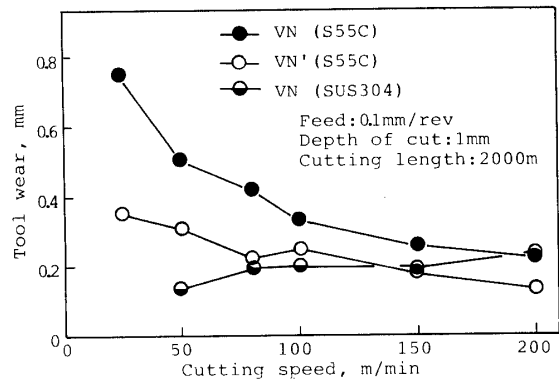
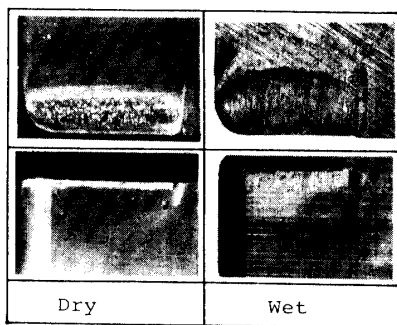


Fig.16 Comparison groove wear between cutting of SUS304 and S55C.

耗形態の相異は次の理由によるものと考えられる。炭素鋼 S55C の場合は組織がパーライト組織であり組織中のセメントイトなど機械的すきとり摩耗を起こさせやすい要素を有しているため前述のように細くて鋭利な機械的すきとりによる摩耗が生じるものと考えられる。一方ステンレス鋼の場合はオーステナイト組織であるため、相手を機械的に擦過してゆく形式の摩耗は少ないものと考えられる。又ステンレス鋼は熱伝導率が小さいため切削熱が刃先に集中し易く、凝着による摩耗が顕著に生じるものと考えられる。Fig. 15 は瞬間停止によって工具と切りくずとの接触状態を S55C と SUS304 の場合で比較して示したものである。両者を比較した場合、SUS304 は切刃先端がだれた状態で切削されて

いるようすがよくわかる。又切りくずも S55C に比較するとノコ歯状になっており、切削熱が刃先にこもり凝着が著しく生じていると推測される。SUS 304 の場合の境界摩耗が刃端より斜めに欠け落ちる摩耗形状を示すのはこの刃先先端がだれた状態で切削されることに強く関連していると考えられる。SUS304 と S55C の境界摩耗の切削速度による変化を Fig. 16 に示す。S55C の場合切削速度の増大につれて減少する傾向であるのに対し SUS304 の場合は逆に増大する傾向を示すことなどからもステンレス鋼 SUS304 における境界摩耗は凝着が主な原因となって生じるものと考えられる。



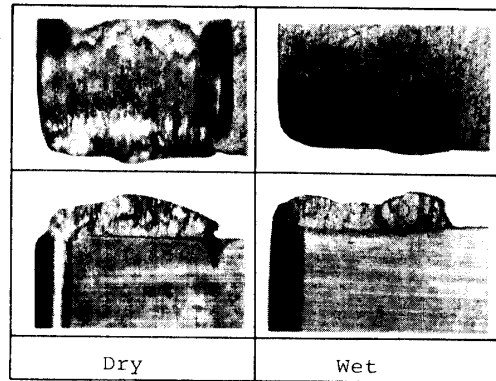
Cutting speed: 150m/min, Feed: 0.1mm/rev, Cutting time: 40min, Depth of cut: 1mm, Tool material: P20, Work material: S55C.

Fig.17 Comparison of tool wears in cutting of carbon steel between dry cutting and wet cutting.

### 3.5 切削油剤の境界摩耗に及ぼす影響

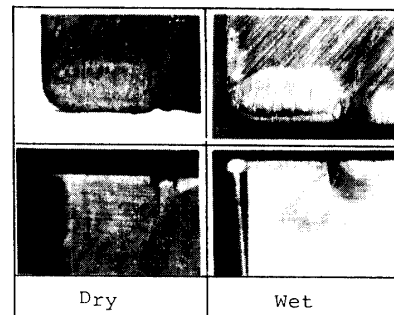
著者は炭素鋼の仕上切削における前にげ面境界摩耗の研究において、油剤を使用した場合、境界摩耗が著しく減少することを示した<sup>(7)</sup>。境界摩耗の減少する要因として、油剤の潤滑作用により加工硬化した被削材及びかえりなどが工具の境界部を擦過することによる摩耗の抑制と空気中の酸素の切削部への侵入が庶断されることにより酸化摩耗が抑制されたためと結論した。今回は通常油性形の不水溶性油剤を使用し横にげ面及び前にげ面上の境界摩耗を同時に観察した。Fig. 17 は乾式と湿式の場合の工具の損傷状態を示した写真である。乾式の場合、フランク摩耗は小さいが鋭利な境界摩耗が生じる。一方湿式の場合は微小チップングによるフランク摩耗が増大し易く、境界摩耗は乾式の場合に比較して小さく不鮮明である。とくに前にげ面上の境界摩耗は明確でない。又切削速度  $V=50\text{m/min}$  以下の低速度で油剤を使用すると境界摩耗が生じにくい

ことがわかった。この低速において乾式切削では境界



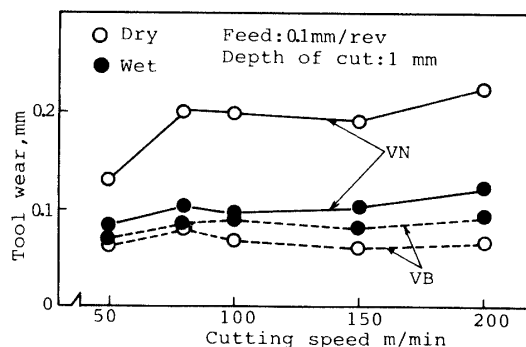
Cutting speed: 20m/min, Feed: 0.1mm/rev, Depth of cut: 1.5mm, Tool material: P20, Work material: S55C.

Fig.18 Shape of built-up-edge clung to tool face.



Cutting speed: 150m/min, Feed: 0.1mm/rev, Depth of cut: 1mm, Cutting time, 38min, Tool material P20, Work material: SUS304, Tool rake angle: positive.

Fig.19 Comparison of tool wear in cutting of SUS304 between dry cutting and wet cutting.



Feed: 0.1, mm/rev Depth of cut: 1mm, Tool material: P 20, Cutting length: 2000m Tool rake angle: positive.

Fig.20 Tool Wear in cutting of SUS304.

摩耗が著しく生じる反面、湿式において生じにくい理由としては次のことが考えられる。まず構成刃先と工具との凝着の強さが両者において異なるためと考えられる。Fig. 18 は切削後工具に付着する構成刃先の形状を乾式と湿式の場合で比較した写真である。湿式の場合、工具に付着する構成刃先は接触面積も小さく刃先の先端部に集中して幅のせまい構成刃先である。一方乾式では裾が広がった中高の形状を示している。このような形状の相異は、構成刃先と工具材との付着力の差によるものと考えられる。乾式の場合は湿式に比較して工具と構成刃先との付着力が強いため、不安定な状態にある境界部の構成刃先が脱落してゆくとき工具材一部をもち去り、そのさい、境界部をよりはげしく擦過してゆくものと考えられる。一方湿式の場合、工具と凝着をおこすことは少なくむしろ境界部を保護しているものと考えられる。又油剤を使用すると、炭素鋼 S55C の場合、すくい面上のクレータ摩耗が生じやすい。これはとくに構成刃先の生じる低速度領域において著しい。著者は以前、水溶性油剤の工具損傷に及ぼす一連の研究の中でこの事実を確認している<sup>(10)</sup>。

次にステンレス鋼の場合について検討する。Fig. 19 にステンレス鋼 SUS304 切削における工具損傷の代表的な写真を示した。又 Fig. 20 は各種損傷を切削速度を横軸にとって比較したグラフである。湿式の場合、乾式に比較して境界摩耗が著しく小さい。これは境界部における被削材と工具との凝着が油剤によりやわらげられたためと考えられる。Fig. 19 に見られるように、乾式の場合、ある程度境界摩耗が進行すると境界部で欠けが生じる場合が多い。これはステンレス鋼の場合、境界摩耗は切刃先端より斜めに欠け落ちるように進展するため、とくに境界部での切れ味がにぶり被削材と工具との凝着が著しくなり欠損に到るものと推察される。したがって、湿式の場合は凝着がやわらげるため、今回の実験条件の範囲内では境界部の欠損は見られなかった。一方フランク摩耗は逆に湿式の場合の方が大きい。これは油剤使用においては切りくずと工具との接触長さが減少し、したがって切りくずのカーブ半径も小さくなり切削力も変動し易いことが影響しているものと考えられる。

#### 4 結 言

- (1) 炭素鋼 S55C の切削において、境界摩耗は加工硬化

した被削材及び被削材のかえりなどによる機械的な摩擦によるものが主原因である。したがって細くて長い形状を示しやすい。

- (2) ステンレス鋼 SUS304 の切削において、境界摩耗は境界部における、工具と被削材との凝着によるものが主原因である。又境界摩耗の形状は切れ刃先端より斜めに進行する深い形を示し、ある程度摩耗が進行すると、境界部が欠損を起す。これは凝着によるものであり、油剤を使用すると凝着がやわらげられるため、境界部の欠損は生じにくくなる。
- (3) 炭素鋼切削において、構成刃先の生じる低速においては一般に境界摩耗は増大する。これは構成刃先が工具と凝着を起し、その構成刃先が脱落するさい、工具材の一部をとり去る現象が生じやすいためと推察される。したがって、油剤を使用して工具と構成刃先の凝着がやわらげられると減少する。
- (4) 工具のすくい角が変わると、境界摩耗の形態も著しく変わる。すくい角が正の場合の方が、にげ面及びすくい面の両面にわたって、はっきりとした境界摩耗が生じやすい。これはすくい角正の場合は切削がなめらかで振動も少なく、安定した切削が行われているためと考えられる。

終りに、ご指導を賜りました、九州大学工学部佐久間敬三教授及び山口大学工学部大草喜太雄教授と北川亮三助教授に深く感謝いたします。又当時の学生笹井泰之君（現日揮㈱）にご援助をいただき深く謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 奥島啓武・垣野義昭：潤滑 18, 2, 136 (1973)
  - 2) A. J. Penkelharing : Microtecnic 14, 2, 61 (1960)
  - 3) 奥島啓武・人見勝人：精密機械 24, 470 (1958)
  - 4) 大野幸彦・竹山秀彦：精密機械 41, 287 (1975)
  - 5) E. J. Tuininga : Annals of CIRP 14(1965/1966) 145
  - 6) C. T. Ansell, J. Taylor : Advances in MTDR (1962) 225.
  - 7) 佐久間敬三・藤田武男：潤滑 21, 748 (1976)
  - 8) 若林 忠・竹中規雄：精密機械 32, 524 (1966)
  - 9) 石橋 彰・甲木 昭・三ヶ尻仁平：日本機械学会論文集 39, 2569 (1973)
  - 10) 佐久間敬三・藤田武男：潤滑 24, 1, 33 (1979)
- (昭和 57 年 10 月 15 日受理)