ホウ化物サーメット工具のすくい面上の 拡散摩耗に関する研究*

新井典久^{*1}, 浜島和雄^{*2}, 青山栄一^{*1}
堀江則俊^{*2}, 池口吉久^{*3}, 山元宗三^{*4}

A Study on Diffusion Wear on the Rake Face of Boride-Cermet Tools

Norihisa ARAI, Kazuo HAMAJIMA, Eiichi AOYAMA,
Noritoshi HORIE, Yoshihisa IKEGUCHI and Syuzo YAMAMOTO

Recently, the reduction of tool cost in mechanical industry has become a serious consideration. Therefore, it is one of the most important subjects in machine shops to develop a tool having a long tool life. Boride-cermet tools are one of the prospective tools which meets such a requirement. However, there are few studies hitherto which deal with the cutting characteristics (wear mechanism) of boride-cermet tools. In the present-day situation, taking up the wear mechanism in rough cutting of S 45 C by the new boride-cermet tool as a subject of this paper, the authors examined such factors as cutting temperature, crater wear at rake face, and diffusion condition at interface between tool and chip. The formula for diffusion at the interface of tool and chip was introduced and diffusion density was also computed by the finite element method.

Key Words: Wear, Cutting Temperature, Boride-Cermet Tool, Crater Wear, Diffusion, Finite Element Method

1. 緒 言

近年, 生産能率の向上のため切削加工条件は高速・高切込みへと, 切削工具にとってはますます厳しくなっている。

このような要求に適した工具の一つとしてサーメット工具があげられる。サーメット工具は高温において, 耐欠損性, 耐摩耗性に優れているため, 機械的摩耗や凝着・拡散摩耗の生じる切削に適した工具として期待されている。

本研究では, 脱タングステンの立場から資源的に豊富なホウ化物を主成分としたサーメット工具について, 熱的影響を受けやすいすくい面上の摩耗機構と, その要因について考察した⁽¹⁾⁽²⁾。すくい面摩耗は, アブレーション摩耗, 凝着・拡散摩耗などの複合であるが, 刃先温度が高い時は凝着・拡散摩耗が主体となる。本研究では拡散層が摩耗に及ぼす影響の考察に重点をおいた。まず切削実験を行い, ついで高温下で接触面を低速でわずかに滑らせる基礎実験を試みた。さらに, フ

ィックの第2法則に切りくず流れを考慮した拡散方程式を作り, 数値解析を用いてシミュレーションを行った⁽³⁾。そして基礎実験の場合と比較した。

2. 実験方法

2.1 切削実験 旭硝子製ホウ化物サーメット工具 30 T と比較用超合金工具 P 20 を用い, 被削材 S 45 C ($\phi 120 \times 300$) の外面旋削を行い, すくい面の摩耗状況を観察した。同時に切削温度を工具-加工物熱電対法により測定した。切削後の工具の重量測定 (クレータ摩耗量測定) には, 島津製作所製 (電子天秤) LIBROR AEL-200 を用いた。また, 切削抵抗も合せて測定し, バイトホルダのすくい角, および逃げ角を考慮し, 切削抵抗の3分力(主分力, 送り分力, 背分力)を工具に作用する垂直荷重に換算した。次に工具と切りくずの接触面積を測定し, さきに求めた垂直荷重を刃先接触面積で除することにより面圧を求めた。なお, これらの切削条件を表1に示す。

2.2 基礎実験 図1に示すように, 試料A(工具材料)と試料B(被削材)の立方体の小片にこう配をつけ, 高温下で加熱しながら互いに滑るようにした。試料の大きさと実験条件を表2に示す。なお, 表中の接触面圧は装置の都合上4(MPa)とした。

* 原稿受付 平成4年7月24日。

^{*1} 正員, 同志社大学工学部(〒602 京都市上京区今出川)。

^{*2} 旭硝子(株)(〒221 横浜市神奈川区羽沢町1150番地)。

^{*3} 野村総研(株)(〒541 大阪市中央区安土町)。

^{*4} 同志社大学大学院。

2.3 元素分析 上述の切削実験および基礎実験後の Fe, Ni の工具, 切りくずそれぞれへの拡散現象を確認するために, クレータ摩耗部を切断した表面を日本電子製 X 線アナライザ JSM-T 300 (EPMA) を用いて分析した。また, B, C のような軽元素は, 日本電子製走査形オージェ電子分光 JAMP-7100 (SAM) で分析した。

3. 実験結果および考察

3.1 切削実験結果および考察

3.1.1 切削実験結果と元素分析 図 2 にサーメット工具 30 T と超硬工具 P 20 で被削材 S 45 C を外面旋削した場合における単位摩擦距離当たりのクレータ摩耗量 dW/dL と切削温度の逆数 $1/\theta$ との関係を示す。

図 2 より, 両工具とも, 低温側で dW/dL が切削温度 θ に影響されない領域があり, 低温での工具摩耗はアブレシブ摩耗が主体となり, その摩耗量は摩擦距離に比例し, 切削温度にはほとんど無関係であることがわかる。また, 30 T の場合, $\theta=1200(\text{K})$ 前後を境に, 高温領域で $1/\theta$ と $\log(dW/dL)$ とが直線的関係にあり, P 20 の場合も $\theta>1400(\text{K})$ の領域で同じような傾向が観察できる。したがって, 切削温度がある値以上になる切削条件下では工具の摩耗は主に温度に支配され, 凝着・拡散摩耗が主体になると推察できる。ただ

し, この場合もアブレシブ摩耗は起こっており, 切削温度上昇による工具強度の低下を考慮すると, アブレシブ摩耗も増加していると考えられる。したがって, 高温下では凝着・拡散摩耗に加えてアブレシブ摩耗も加わるので, 全摩耗量は急激に増加する。以上の結果より, それぞれの工具に対する摩耗変態温度を求めることができ, 温度による摩耗状態の大別が可能となる。また, これらは, 竹山の摩耗方程式⁽⁴⁾ によく対応している。

また, 切削実験において凝着・拡散摩耗の影響があると推察される工具のすくい面上の元素分析を EPMA, SAM により行ったが, Ni, Fe の拡散は明らかにできなかった。一方, B, C はわずかながら拡散していることが確認できた。そこで, 切削実験条件下の Ni, Fe の拡散現象の有無および工具強度の低下については基礎実験において確認することにする。

3.1.2 工具摩耗と凝着・拡散作用の関係 本節では工具摩耗におよぼす凝着・拡散作用を考察する。そこで切削実験より得られた切削温度と工具の刃先接触部にかかる垂直荷重 (面圧) の関係を図 3 (30 T) に示す。図より, 切削温度が上昇しても S 45 C 切削時の刃先面圧はほぼ一定 ($P=190(\text{MPa})$) であることがわかる。P 20 による切削実験の場合も同じ傾向であっ

表 1 切削条件

Feed	f (mm/rev)	0.20
Depth of cut	t (mm)	1.0
Cutting speed	V (m/min)	50 ~ 250

図 1 基礎実験装置

表 2 基礎実験条件

Dimension of testpiece A (mm)	2×2×4.5
Dimension of testpiece B (mm)	5×5×5
Contact pressure (MPa)	4
Heating temperature (K)	1473
Holding times (s)	1800
Flow rate of argon gas (cm ³ /s)	8.3

図 2 $1/\theta$ と dW/dL の関係

た。このような大きな圧力とともに、工具に接する切りくず表面は新生面で完全な清浄面であり、さらに接触部は極めて高温になることなどから、工具と切りくず中の元素は非常に活性化しやすくなり、容易に切りくずと工具が凝着を起こすと考えられる。

次に工具刃先接触部の拡散現象⁽⁵⁾は、大きな刃先面圧により真実接触面積が増加し、工具と被削材の境界面は密着した状態になっているため拡散しやすくなっている。また、新しい切りくずが工具表面に沿って、高速で流出していくため接触境界面で、常に切りくず元素濃度が初期状態に近い状態にあると考えられる。したがって静的な場合の相互拡散に比べ工具・切りくず元素の拡散量が多くなり、切削時における拡散は静的な拡散と比較して活発になるものと考えられる。

3.2 基礎実験結果および考察

3.2.1 基礎実験の元素分析 本実験は切削実験により生じるクレータ摩耗原因の一つと考えられる拡散現象を確認するため切削に近い状態で行った。試料は、切削実験に使用した工具材料 30 T と被削材 S 45 C の組合せである。

ここで、拡散層の大きさを調べるために、ある位置での拡散元素の分布状況を EPMA で点分析した。図 4 に 30 T-S 45 C の測定位置を、図 5 に分析結果を示す。なお、試料左側が S 45 C、右側が 30 T である。Fe に関して①～⑦の位置まで順に観察していくと、工具側の③、④、⑤、⑥の地点、すなわち、境界面から工具側 60 μm まで明らかに Fe が確認できる。Ni についても被削材側の②の地点、すなわち、被削材側に 20 μm まで拡散している。

以上の結果より、 $\theta=1473(\text{K})$ 、 $P=4(\text{MPa})$ の条件で、30 T-S 45 C の間で拡散が起こることが確認できた。これにより切削においても拡散が生じていること

が推察できる。また、工具強度の低下は境界面近傍の粒子の脱落から確認できる。したがって、拡散層が工具強度の低下に大きな影響を与えようと考えられる。

3.2.2 拡散層と工具強度の関係 基礎実験による研磨断面では、拡散層中で粒子の脱落が確認された。そこで、拡散層が工具強度に及ぼす影響をより詳しく調べるために基礎実験に用いた試料の境界面近傍の硬さ試験を行った。その結果を図 6 に示す。30 T-S 45 C の場合、もとの状態 ($H_v=1250$) での硬さに比べて境界面から工具側 100 μm まで軟化していることが確認できた。また、これらの厚みは拡散層の厚みにほぼ一致している。以上の結果から、拡散層域での境界面近傍の工具硬さの低下が明らかになった。したがって、工具中の Ni が拡散により被削材側に流出し、

図 4 基礎実験の元素測定位置 (30 T-S 45 C, 1473 K×30 min)

図 5 基礎実験時の境界面付近の元素分析

図 3 切削温度と表面圧の関係 (30T-S45C, $f=0.2\text{mm/rev}$, $t=1.0\text{mm}$)

被削材中の Fe が工具材中に進入するため工具材の軟化が進行するものと考えられる。そのため粒子 (Mo_2NiB_2) と結合材 {Ni(Mo)} との境界での結合力が低下し粒子が脱落するものと考えられる。この現象は同時に工具強度の低下にもつながる。

以上より拡散層での、工具強度の低下が確認された。したがって、切削時の高温領域での摩耗量の増加に拡散現象が大きく関係していると考えられる。

ここで 3・1・1 節で述べた切削実験の元素分析結果と 3・2・1 節の基礎実験の結果を比較すると明らかに大きな違いがある。これは、生成した拡散層がもとの工具強度に比較して低下しているため、凝着した工具材が切りくずとともに持ち去られるため、切削後の刃先接触部では拡散層が確認できなかったものと考えられる。また、切削中の切りくず流出速度の影響も重要な要素と考えられる。そこで、この影響については次節で解析モデルを用いて数値解析することによりさらに詳しく調べる。

3・3 切削中の拡散シミュレーション 切削実験に用いた工具の刃先接触面の拡散現象と基礎実験の拡散現象では明らかに拡散の進行状況に違いを生じた。この原因の一つとして、切削中の切りくず流れの問題があげられる。これは明らかに一般の静的な拡散とは大きく異なる。そこで以上のことを考慮して、切削中の拡散現象を数値解析手法を用いてシミュレーションを試みた。また、比較のために基礎実験の場合のシミュレーションも試みた。

3・3・1 基礎方程式 切削中の刃先接触面での拡散現象を求める手段として、二次元非定常流のもとでフィックの第 2 法則を適用した。非定常二次元拡散方程式は、次式で表される⁽⁶⁾。

図 6 境界面からの距離とビッカース硬さの関係 (押込み荷重 10N)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_r \frac{\partial C}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left(D \frac{\partial C}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(D \frac{\partial C}{\partial Y} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式中の C は元素濃度、 D は拡散係数、 V_r は Y 方向の切りくず速度である。また、拡散係数 D は次式で表される⁽⁷⁾。

$$\log D = \log D_0 - (Q/2.3RT) \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式中、 D_0 は振動数因子、 Q は拡散の活性化エネルギー、 R はガス定数、 T は温度である。 D_0 と Q の条件を表 3 に示す。本解析では刃先接触面での温度分布を求め、それぞれの温度に対して式 (2) により拡散係数 D を決定した。図 7 に解析モデルを示す。解析を図中の A の領域について行った。刃先接触領域の周囲は拘束せず、初期条件は拡散物質のある側の元素濃度を 100%、もう一方を 0% とした。以上の条件で、ガラキン形有限要素法の定式化を用い、時間積分の定式化にはクラנק・ニコルソン法を用いて数値解析を行った。

3・3・2 解析モデル 解析に用いた対象領域は、図 7 の A 領域とする。A 領域は、境界面から工具側、切りくず側の X 方向にそれぞれ 80 μm とし、極めて微小な領域を対象とした。次に解析に用いた切削温度、切削速度、切削時間を表 3 に示す。また、本解析は工具側の Ni と切りくず中の Fe を扱った。

3・3・3 数値解析結果および考察 図 8 に工具中の Ni の切りくずへの拡散と、切りくず中の Fe の工

表 3 解析条件

A Fundamental test	$\theta = 1473 \text{ (K)}$, $t = 1800 \text{ (S)}$
B Cutting test	$\theta = 1473 \text{ (K)}$, $t = 120 \text{ (S)}$ $V = 125 \text{ (m/min)}$

図 7 工具と切りくずの境界面

具への拡散に関する解析結果を示す。これらの解析結果は基礎実験結果とよく似た傾向を示しており、本解析が有効であることがわかる。また、切削速度の影響による拡散進行状況の変化を観察するため、切りくずに速度を与えた場合における Ni, Fe の拡散に関する解析結果を図 9 に示す。ここで図 8 と図 9 を比較してみると、図 8 の拡散時間が 1800 (s)、図 9 の拡散時間が 120 (s) であるので、図 9 の切削の場合のほうが単位時間当たりの拡散量が極めて多いことがわかる。したがって、切削の場合、静的な拡散と比較して拡散時間が短いために拡散量が微量になるとは一概にはいえない。

以上の結果より、切削中における拡散は、静的な拡散現象と比較して特異な現象であることがわかった。したがって、切削実験の EPMA 分析において工具・切りくず境界面近傍で拡散層を確認できなかったのは、拡散によって工具強度の低下が生じ、凝着した部分が切りくずとともに持ち去られるためであることがわか

る。

4. 摩耗メカニズムのモデル化

上述の切削実験結果、基礎実験および EPMA 分析結果から、切削中におけるホウ化物サーメット工具のクレータ摩耗メカニズムについてまとめる。

今回用いたホウ化物系サーメット工具 30 T は高速切削域で使用されるため、それに伴う切削温度も極めて高温になる。そのため 30 T の摩耗切削温度に大きく影響を受けることが切削実験より明らかになった。この結果、30 T の摩耗形態は熱的摩耗、すなわち凝着・拡散摩耗が支配的であることがわかった。そこでこれらの結果を基にして切削時の摩耗メカニズムをモデル化すると図 10 のようになる。すなわち、① は切削前の工具断面のモデル図である。図に示す粒子（空白部）は Mo_2NiB_2 で結合剤（斜線部）は Ni (Mo) である。この状態では組織に変化はみられない。次に切削を行い、切りくずが工具に接触した瞬間を②に示す。この状態ではすでに境界面温度は 1300 (K) に達し、面圧も 190 MPa になる。これより、切りくず側は軟化を起こし工具との間で凝着を起こす。そして切りくずに対し親和性が高くなり、真実接触面積も増大する。また、工具側では結合剤に用いられている Ni、切りくず側では主成分の Fe がそれぞれ拡散を起こしはじめる。次に、③では、結合剤中の Ni が拡散するためと Fe が拡散するために結合剤の強度が低下する。そして切りくず流れのせん断力により切りくずと凝着を起こした結合剤の一部が工具から削り取られる。④に結合剤の離脱後の境界面のモデルを示す。モデルより切りくず、工具の境界面は工具組織中の粒子が主である。ここで先に述べた面圧は一定であるから粒子に対して極めて大きな圧力が加えられ、B の拡散も影響して粒子の強度低下が考えられ、⑤の状態になり一挙に塑性変形して押しつぶされる。また、結合剤の離脱により、

図 8 拡散濃度曲線〔表 3 ④による解析結果（基礎実験）〕

図 9 拡散濃度曲線〔表 3 ⑥による解析結果（切削）〕

図 10 ホウ化物サーメットの摩耗モデル

粒子が脱落し、アブレシブ摩耗も生じる。その結果⑥のようなモデルになり、これは②と同様であるため、このようなメカニズムの繰返しによる摩耗が進行すると考えられる。

5. 結 言

(1) ホウ化物サーメット工具のすくい面上の摩耗形態を、温度により大別することができた。その結果、約1200(K)を境に高温領域では凝着・拡散摩耗の影響が大きく、低温領域ではアブレシブ摩耗の影響が大きいことが明らかとなった。

(2) 基礎実験後の工具すくい面と切りくず境界面近傍の硬さ測定を行った結果、拡散層の硬さはもとの硬さと比較して低下していることが認められ、拡散に

よる強度の低下が明らかとなった。

(3) 数値解析結果より、切削中の切りくずの流れ(速度)が拡散の進行に大きな影響を与えることが証明された。

文 献

- (1) 勝村, 精密機械, 46-5 (1980), 553.
- (2) Kramer, H. M. and Suh, N. P., *ASME*, 102-10 (1980), 303.
- (3) Bhattacharyya, A., Ghosh, A. and CIRP, *Ann.*, 16 (1968), 369.
- (4) 竹山・村田, 精密機械, 27-1 (1961), 33.
- (5) 深井, 拡散現象の物理, (1988), 3, 朝倉書店.
- (6) 矢川, 流れと熱伝導の有限要素入門, (1983), 103, 培風館.
- (7) 幸田, 金属物理学序論, (1989), 111, コロナ社.