アルミニウム合金の湿式切削における超硬合金 工具摩耗の考察

財満 鎮雄* ・高辻 雄三**
奥島 裕樹*** ・山田 茂**

Some Considerations on the Carbide Tool Wear in Wet Cutting of Aluminum Alloys

UDC: 669.715: 621.9.025.7

Shigeo ZAIMA*, Yuzo TAKATSUJI**,
Hiroki OKUSHIMA*** and Shigeru YAMADA**

Wet cutting tests of wrought and cast aluminum alloys 7075-T6 and AC3A were carried out using P10 and K10 carbide tools. Electron probe microanalyses were made on the tool face worn at different stages of cutting. The face of P10 and K10 tools near the tool edge worn by cutting 7075-T6 and the face of a P10 tool grooving worn by cutting AC3A lie wast and reduce the Co concentration. When the built-up edge-like deposits on the tool edge fall off in cutting 7075-T6, the pressure welding wear acting to carry away the sintered particles and Co results in dilution of Co on the worn tool face. The crater on both tools which have cut 7075 and the grooving wear face on the K10 tool which has cut AC3A are smoothened and rich in Co, probably because of the scratching wear acting. The K10 tool is stronger than P10 in cutting aluminum alloys.

(Received April 17, 1981)

1. 緒 言

アルミニウム合金のうち、例えば展伸材では 7075-T6 材、鋳造材では Al-Si 系鋳造合金など数多く実用には供されているが、ほかのアルミニウム合金の切削ではみられないような激しい工具摩耗の発生がみられることも事実である¹⁾。さきに、これらの合金 7075-T6 材、AC3A 材などの湿式切削における高速度鋼工具について工具摩耗を検討し、工具摩耗の発生機構を考察した²⁾。その結果、7075-T6 材の切削ではすくい面摩耗、逃げ面摩耗、AC3A 材の切削では横切刃、前切刃に境界摩耗が発生するなど工具摩耗の発生形態は異なるが、摩耗部分そのものは切削中に工具面と接触する被削材、切屑中にある極めて高い硬さの微粒子が工具面にぶつかり、工具組織中の W 炭化物粒子のまわりを削り取り、やがて W 炭化物粒子を浮き上らせ、それを脱落させる形態で進行する

ものであることを示した。しかし、現在これらの合金の切削工具の主流は超硬合金が占めており、JIS の工具選択基準によればアルミニウム合金の切削には K 分類の工具が推奨されているが、なぜ K 分類工具がアルミニウム合金の切削に適合するか、また展伸材 7075-T6 材の切削でも鋳造材 AC3A 材でも一様に K 分類工具が推奨されるかなどについては、必ずしも明確にはされていない。本報では、これらの合金について 2 種類の超硬合金工具を用いて湿式切削を行ない、この場合に発生するすくい面摩耗、逃げ面摩耗、境界摩耗などの工具摩耗の実態を調べ、湿式切削における超硬合金工具の工具適応性を工具摩耗の面から検討するのを目的とした。

2. 供試試料および実験要項

実験に供した試料は **Table 1** に示す前報²⁾と同一化学成分の展伸材 7075-T6 材 (いわゆる超々ジュラルミン) お

* 静岡大学工学部機械工学科(浜松市)。Department of Mechanical Science, Faculty of Engineering, Shizuoka University (Hamamatsu).

** 富山大学工学部生産機械工学科(高岡市)。Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, Toyama University (Takaoka).

*** 静岡大学大学院工学研究科(浜松市)。Graduate School, Shizuoka University, (Hamamatsu).

Table 1 Chemical Compositions of Specimens.

Material	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	Na (%)	Sn (%)	Al (%)
7075-T6	0.5	0.7	1.6	0.3	2.1	0.11	5.6	0.2	—	—	bal
AC3A	12.8	0.2	—	—	—	—	—	—	0.02	0.41	bal

Table 2 Mechanical Properties of Specimens.

Material	Tensile Strength (MPa)	0.2% Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Vickers Hardness Hv
7075-T6	570	483	11.0	142
AC3A	135	71	4.0	49.5

よび鋳造材 AC3A 材（シルミン）で、それらの機械的性質は Table 2 に示すようである。

刃先諸元 0-10-6-6-6-0-0 を有する 2 種類の超硬合金製工具（JIS 分類, P 10 および K 10）を使用し、昌運カヌープ旋盤 HB-500 型（主軸回転数 40~3200 rpm, 9 kW）によって切削試験を実施した。切削条件は切込み $t_1=1$ mm, 送り $f=0.1$ mm/rev 一定とし、削り速度を 7075-T6 材では $v=5$ m/s, AC3A 材では $v=2$ m/s とし、市販のマシン油を切削油剤とした湿式切削である。また、工具付着物は水酸化ナトリウム水溶液で腐食除去して切刃を観察し、すくい面表面分析には X 線マイクロアナライザを用いた。

3. 7075-T6 材の湿式切削

3.1 P10 工具の場合

Photo 1 上段は切削時間 $t=1200$ s 湿式高速切削した場合に、工具すくい面上に生ずる工具摩耗の全体像、分析方向を示す。工具摩耗の全体像をみれば高速度鋼工具の場合²⁾と同様、すくい面上に一定幅のクレータが発生している。下段の写真は①の部分拡大撮影したもので、切刃には狭いが一定幅で荒れのひどい領域があり、その下方の面は滑らかであるが切屑流出方向に沿って無数の摩擦痕が認められる。その面に続いて切刃先から 0.15~0.25 mm の範囲で再び表面荒れのひどい部分が続く、写真最下部には切刃を研削仕上げした時の研削条痕が認められる。摩耗面ではこの砥石による研削条痕がほぼなくなっていること、工具面の表面あらさの測定結果から研削条痕の深さが最大でも 1 μ m 程度であることなどから、摩耗の程度は少ないことがわかる。Photo 2 は切刃中央部②の部分拡大写真で、切刃先の表面荒れがひどい部分の幅は約 15 μ m 程度ではほぼ一定である。この幅は前述のように高速度鋼工具で 7075-T6 材を切削した場合に切刃先端に生ずる末摩耗部分の幅²⁾と同じで、

Photo 1 Aspects of P10-tool worn by wet cutting 7075-T6 continuously for 1200 s. A, B, and C: scanning directions.

Photo 2 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs on the center part of P10-tool edge worn by cutting 7075-T6.

Photo 3 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs on the magnified part of P10-tool edge indicated Photo 2 worn by cutting 7075-T6.

Photo 4 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs on the terminal part of crater in P10-tool worn by cutting 7075-T6.

超硬合金工具の場合にも構成刃先が生成付着し、その構成刃先が脱落する時に構成刃先が凝着していた表面粒子を持ち去るものと思われる。また、写真にみるように切刃先には Al, Mg などの元素の存在が認められるが、この付着元素は焼結粒子が持ち去られてできた切刃先のくぼみ底部に付着し、Al は付着物除去の際に化学的腐食を受けずに残り、Zn は極めて溶けやすいために付着が認められないもののようである。**Photo 3** は切刃部分をさらに拡大した③部分の写真である。写真面上で粒子の脱落がみられ、その穴の内部に Photo 2 でみられた Al, Mg などの元素が付着していたわけである。写真の下方 1/3 の部分はクレータ摩耗の開始部分で滑らかな面となっているが、Co の分布をみれば摩耗部分では粒子間のすきまに存在しているようで、斑点状に分布している。一方、切刃先の焼結粒子が脱落した部分で Co の付着は認められない。このことから焼結粒子が脱落する際に Co も同時に持ち去られることがわかる。ほかの元素では、W が面全体に分布していること、W は多くあるが Ti が全くない部分のあること、切刃先のくぼみ内部を中心に表面の荒れた部分に C があることがわかる。また、クレータ中央部分の拡大写真をみれば、切屑流出方向に沿ってきた摩耗溝が多数みられ、かつ焼結粒子間にすきまが多く、元素分布からは Cu がいくぶん付着している以

外に被削材元素の分布はみられなかった。その部分をさらに拡大すれば、表面が滑らかで細かい摩耗痕がみられ、個々の焼結粒子の摩耗面の縁が鋭いことなどから、高速度鋼工具の摩耗の場合と同様 7075-T6 材組織内の硬質微粒子による引掻き摩耗が考えられる。この部分も元素分析写真から Co は粒子間のすきまに斑点状に分布している。このような引掻き摩耗面で Co が多いのは摩擦熱のため表面近傍の Co が内部に浸透し、そのため表面直下の層では Co が豊富になり、ますます引掻き摩耗を起しやすい状態になると考えられる。

Photo 1 にみる摩耗終端部をさらに拡大した写真をみれば、表面粒子がたくさん持ち去られており、そうしてできたくぼみには Cu, Mg が多く分布している。この部分は切屑が工具面から徐々に離れていくところで、切屑が工具面におよぼす摩擦力も低く、付着物が工具面に凝着する部分である。元素分析にみられる Cu, Mg はそうしてできた付着物の凝着面付近にあつた成分で、切屑が工具面から離れていくときの力で付着物が脱落する時表面粒子も持ち去られるものと思われる。この部分の中央付近をさらに拡大した⑦の部分を示すものが **Photo 4** で、粒子の脱落状態がクローズアップされている。この部分でも粒子が持ち去られているところでは Co がみられず、前述の切刃先端部の場合と同様焼結粒子と共に Co が持ち去られたものであろう。

Fig. 1 Characteristic X-ray intensities on tool face worn by continuous wet cutting 7075-T6 in scanning directions shown in Photos 1 and 5. (Upper: P10-tool; Lower: K10-tool)

Fig. 1 上段は Photo 1 に示した走査方法ですくい面上の元素分布を求めた線分析の結果である。これからみればA④B④C④どの線分析でも切刃から0.15~0.25 mmの範囲にCu, Mg, Alの付着がみられ、Cu, Mgも多いが、Znは全くみられない。被削材中には比較的多く含まれるが、付着物を腐食除去する際に溶解しやすい元素が少なくなっていることから、この部分の付着物は表面層に固く凝固するものの拡散していないことがわかる。一方、切刃先にはAlが多くみられ、元素分布写真にみるように切刃先にできたくぼみ部分の付着物によるものと思われるが、クレータ終端部付着物に比較してこの部分でCu, Mgなどの元素が少ないことから、クレータ終端部ではCu, Mgなどの被削材中の合金元素が多く集まっているようである。

3.2 K10 工具の場合

P10工具の場合と同様、切削時間 $t=1200$ s 湿式高速切削ですくい面に生ずる工具摩耗の全体像、走査分析方向および摩耗中央部分の拡大写真を **Photo 5** に示す。

Photo 5 Aspects of K10-tool worn by wet cutting 7075-T6 continuously for 1200 s. A, B and C: scanning directions.

切込みの範囲にわたってクレータ状のごく浅い摩耗部分が生じており、切刃先端には一定幅の表面荒れのひどい範囲がみられること、その下方に滑らかではあるが切屑流れによつて摩耗を受けた面のあることなどP10工具の場合と同様であるが、摩耗面の終端部には工具表面の荒れはみられなかった。このことから、切屑が工具面から離れる際にP10工具では粒子間の結合力が弱く、K10工具ではそれが強いこと、すなわち、K10工具内の粒子間結合力がP10工具のそれより大きく、7075-T6材に対してK10工具が抵抗力が大きいといえる。また、摩耗面上で研削条痕がほぼなくなっており、この場合も最大摩耗量はクレータ深さにしてほぼ $1\ \mu\text{m}$ 程度であることがわかる。切刃中央摩耗部分の拡大写真をみれば、切刃の表面荒れのひどい部分の幅は約 $20\ \mu\text{m}$ で、P10工具の場合のそれよりやや大きい。この場合にも構成刃先が発生し、その脱落の際に表面粒子を持ち去るものようである。元素分布をみれば切刃先にAlの分布がみられ、ほかの元素の付着はない。さらにこの部分を拡大してみれば、表面の荒れは顕著になり、焼結粒子の粒界がはつきりし、Wは全面にわたって一様に存在し、Coが全面でみられないことから、K10工具の場合にも焼結粒子脱落の際にCoが持ち去られると思われる。クレータ中央部分の拡大写真では切屑流出方向に沿つてできた摩耗溝がみられるが、P10工具の場合ほど表面のうねりは大きくなく、また、この部分では切刃先部分よりもCoが多く、かつ焼結粒子の狭い粒間部分に集中して斑点状に分布しており、P10工具の場合と同様、切削熱によつて内部へ拡散浸透していると考えられる。

Fig. 1 下段は Photo 5 に示した要領で行なつた線分析の結果である。すくい面のどの部分でも切刃から0.15~

0.25 mm の範囲に Cu, Mg, Al の付着がみられ, 中でも Cu 量が多く, Mg が続いているが, Zn は全くみられない。この付着元素の多い範囲は P10 工具で 7075-T6 材を切削した際のクレータ終端部の表面荒れのひどい領域とほぼ一致しており, 切屑流れの形は P10, K10 両工具の場合に同じであるとみられる。この場合にも切刃先には Al の付着のみがみられた。

3.3 検 討

超硬合金 P10, K10 両工具で 7075-T6 材を湿式切削する際に生ずる工具摩耗を検討したが, どちらの工具でも切刃先に構成刃先の生成が想像された。この構成刃先が工具面の焼結粒子に凝着して脱落する際に焼結粒子が持ち去られる凝着摩耗機構が働いているが, 7075-T6 材に対しては P10 工具より K10 工具がじょうぶであることがわかる。一方, クレータ状の摩耗面では高速度鋼工具の摩耗の場合と同様, 7075-T6 材内に存在すると思われる組織, 例えば Al-Cu-Mg, CuAl_2 , MgZn など, とくに引掻き硬さが高いと思われる FeAl_3 , Mg_2Si など³⁾の硬質微粒子による摩耗, 引掻き摩耗機構が考えられる。

4. AC3A 材の湿式切削

4.1 P10 工具の場合

切削時間 $t=540\text{s}$, 湿式低速切削した場合に生ずる工具摩耗の例を **Photo 6** に示す。高速度鋼工具の場合に比べて摩耗の進行ははるかに遅いものの, 切込みに相当する部分に境界摩耗が発達しており, 程度の差はあるが刃先先端からおよそ 2 mm, 切刃から 0.5 mm 程度の長方形領域に摩耗が生じている。切刃先端から順次各部分を拡大してみれば, 広い範囲にわたって表面は荒れて摩耗している。境界摩耗の開口幅は約 0.3 mm, すくい面側からみた境界摩耗による刃先の後退量は約 $30\text{ }\mu\text{m}$ であった。

刃先先端部の拡大写真をみれば一面ざらざらとして, Al の付着は比較的多く, それにもまして Si の付着が多く, Co は全くみられなかった。同様に, 切刃中央部分も拡大写真 **Photo 7** のように荒れた面になつており, Al の付着は少ないが, Si が切刃先に多く, Co はやはり全然認められていない。このように表面の荒れがひどいこと, Co が全くみられないことから, 焼結粒子が持ち去られて摩耗が進行するものとみられる。また, 切刃先部分で Si が多く分布していること, P10 工具に多く含まれている Ti と被削材中の Si とが同族元素であることから切刃先部分では切削熱の影響もあつて Si が焼結粒子間に侵入し, 粒間がもろくなつたところを切屑が擦過して摩耗が進行する機構が考えられる。**Photo 8** は境界摩耗開口部の拡大写真であるが, ここでも Al, Co の分布はなく, Si も比較的少ない。この部分では切屑端面

Photo 6 Aspects of tools worn by wet cutting AC3A continuously. (Left: P10-tool after 500 s cutting; Right: K10-tool after 9600 s cutting)

Photo 7 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs on the center part of P10-tool edge worn by cutting AC3A.

が工具面にぶつかる衝撃のため生ずる微細なチッピングによつて摩耗が進行するようである。摩耗面と非摩耗面との境界付近をみれば, 表面が荒れてざらざらした面の中に一部平らかな表面部分がみられ, そこには Co が多い。この平らかな面は工具研削のままの面であり, 荒れた面は P10 工具では切削熱の影響で表面付近の Co が内部に拡散集中するものと考えられる。Si は摩耗面の側にややみられるものの付着量は少なく, Al はみられない

Photo 8 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs on the grooving wear part of P10-tool worn by cutting AC3A.

かった。切削に関与しない工具面の拡大写真では全体に研削したままの平らかな面が多く、この部分には Co も多い。

Fig. 2 上段は切刃に直角に切刃先端部④、切刃中央部⑤および境界摩耗部⑥の特徴的な3カ所で行なった線分析の結果である。④では Co の分布はなかつたが、これは走査範囲がすべて摩耗面となっており、Co が焼結粒子脱落とともに失われるためである。それに対し⑤、⑥範囲では切刃先から0.6~0.7 mmの摩耗域をぬけるあたりで Co が増加しており、前述の末摩耗部分に Co が多かったことと一致している。Si 分布は④、⑤分析では切刃先端部にまず分布が認められ、摩耗面ではとくに決まって集まることなくランダムに分布していた。⑥分析では境界摩耗の終端部分にわずかに Si の付着が認められる程度である。Al は④、⑤分析では切刃先の後方0.1~0.2 mm の位置で付着が認められたが、これは切削中すくい面を覆っている付着物前縁部の成分が切屑流出に

Fig. 2 Characteristic X-ray intensities on tool face worn by continuous wet cutting AC3A in same scanning directions shown in Photos 1 and 5. (Upper: P10-tool; Lower: K10-tool)

伴って工具面にできたくぼみ内に埋め込まれ、腐食除去の際溶解しきれず残ったためである。境界摩耗部分⑥には Si の場合と同様 Al はみられない。

4.2 K10 工具の場合

切削時間 $t=9600$ s の長時間湿式切削した際に生ずる工具摩耗は Photo 6 右側のようにになる。K10工具としてとくに目立つ工具摩耗は発生しなかつたが、切込み付近に高速度鋼工具に生じた境界摩耗と同様な表面性状の変化した部分がみられ、切刃先端から切込みより 0.2 mm 程度の外側までの範囲で写真では白く写っている摩耗部分がみられた。摩耗部分は全体として表面が荒れてざらざらした面となり、境界摩耗部分を除いて砥石研削痕が残る、摩耗が極めて少ないことがわかる。切刃先端部の拡大写真をみれば、どこも荒れた表面状態で Co が切刃先部分だけにあり、Al, Si の付着はなかつた。**Photo 9** は切刃中央部⑤の範囲の拡大写真である。切刃先部分に約20 μ m の部分がその下方部分に比較していくぶん黒くなっており、この部分に Co も多い。Al, Si はこの Co の分布域の下方に同程度の幅で分布しているが、P10 工具の線分析で切刃先から 0.1~0.2 mm に多かった Al, Si の分布と同様な原因で生じたものと思われる。Co が刃先部分約20 μ m の幅に多くみられることから、この位置を境にして下方には付着物がついて切屑の擦過から工具面を保護し、切刃先部分は切削熱によって Co が拡散しているのである。

切刃部分の境界摩耗面をみれば平滑になつており、そ

Photo 9 Secondary electron and characteristic X-ray micrograph on the center part of K10-tool edge worn by cutting AC3A.

Photo 10 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs on the grooving wear part of K10-tool worn by cutting AC3A.

の中央部分を拡大撮影した **Photo 10**をみても、表面は平滑で全面にわたって Co も多く存在し、切刃部分の状態は 7075-T6 材切削の際生ずるクレータ面と類似している。Si は Co と同様に付着しているが、切刃からいくぶん離れているため切屑に擦過される頻度も少なく、付着物が発生するとみられる。また、境界摩耗終端部では切刃からかなり離れており、Co, Si の分布もみられずかつ砥石研削条痕も認められる。

Fig. 2 下段はすくい面上の線分析の結果である。これからみても切刃部分と境界摩耗部分で Co が多く認められる。Al, Si の分布は④⑥線分析では切刃部分、③では境界摩耗部分のように摩耗のためくぼみができ、かつ切屑が衝突する部分に多いことがわかる。

4.3 検討

超硬合金 P10, K10 両工具で AC3A 材の湿式切削を実施した結果は、高速度鋼工具による場合と同様の境界摩耗がみられ、切刃先端から切込みの位置までの範囲に切削終了時に付着物が付いた点などの被削材の挙動は工具材質によって変わらなかった。P10 工具では工具材質の中に被削材中の Si と性質の似た Ti が多いこと、工具研削時に Co の拡散移動が起こっており、表面粒子の脱落の際 Co が持ち去られて摩耗しやすくなっているが、K10 工具では粒間結合力が大きく、引掻き摩耗が生じにくくなっているものと思われる。

5. 結 言

超硬合金工具による湿式切削では工具摩耗に 2 つの摩耗発生機構が作用していると思われる。7075-T6 材を切削した P10, K10 両工具の切刃付近や、P10 工具で AC3A 材を切削した際生ずる境界摩耗面は表面の荒れがひどく、Co が少なくなっている。そして 7075-T6 材の切削では切刃部先端に構成刃先様の付着物が形成され、この付着物が脱落する際凝着した焼結粒子を持ち去る凝着摩耗機構が作用している。また、AC3A 材を切削した P10 工具の境界摩耗面では切屑端面がぶつかる衝撃によって焼結粒子間の結合が破壊されて、焼結粒子が持ち去られる。どちらの場合にも、焼結粒子が持ち去られると同時に結合剤の Co も持ち去られるため、この摩耗面では Co が少なくなっている。一方、7075-T6 材を切削した際生ずるクレータ摩耗面や AC3A 材を切削した K10 工具の境界摩耗面は表面が滑らかで Co が多くみられる。7075-T6 材中の硬質微粒子、AC3A 材中の Si 微粒子などによって摩耗が進行する引掻き摩耗機構が作用していると思われる。この際摩耗面は湿式切削にかかわらずかなり高温になるため、Co が内部に浸透拡散して焼結粒子間の結合を強め、凝着摩耗よりは引掻き摩耗を促進させるものである。

本報の実施に当たり、その費用の一部は(財)軽金属奨学

会の研究資金により、試料入手には¹⁾日本軽金属総合研究所磯部俊夫氏、前田軽金属工業²⁾鈴木村勝一氏に負うところが大きかった。付記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 財満鎮雄, 鈴木康夫, 奥島裕樹, 山田茂: 軽金属, **31**, 5 (1981), 341.
- 2) 財満鎮雄, 高辻雄三, 奥島裕樹, 山田茂: 軽金属, **31**, 6 (1981), 378.
- 3) アルミニウム加工技術便覧, (日刊工業新聞社, 昭和45年版), 280.