アルミニウム合金に対する DLCコーテッド工具のドライ切削性能*

横 田 知 宏** 澤 武 一*** 横 内 正 洋**

Performance of Diamond-like Carbon Coated Tool in Dry Cutting of Aluminum Alloys

Tomohiro YOKOTA, Takekazu SAWA and Masahiro YOKOUCHI

The purpose of this study was to clear the conditions for good performance in dry cutting of aluminum alloys with non-hydrogenated diamond-like carbon (DLC) coated tool. The intermittent and continuous cutting tests were conducted under dry condition to 4 types of aluminum alloys. Consequently, it was found out that DLC coated tool showed good performance in intermittent cutting of A5052 and A7075 (Wrought aluminum alloys), but it didn't show good performance in intermittent cutting of AC2A and AC8A (Aluminum castings) and in continuous cutting of A5052 and AC2A. It was thought that the disappearance of DLC coating on the tool rake face caused adhesion in cutting of aluminum castings and continuous cutting of wrought aluminum alloys.

Key words: diamond-like carbon, aluminum alloy, dry cutting, adhesion, friction coefficient

1. 結 言

近年、地球環境問題への関心が非常に高いことから、生産プロセスにおいて CO₂ 排出量削減などの対策をとることが重要な課題である。工作機械で消費される電力のうち、切削油剤を供給するクーラントポンプの消費電力は大きな割合を占めており、多くの CO₂ を排出する要因の一つとなっている¹⁾²⁾。そのため、切削加工においては切削油剤の使用量を削減し、クーラントポンプの消費電力を抑えることが重要である。このような観点から、切削油剤を使用しない乾式（ドライ）切削は工作機械の消費電力を削減するために有効な手段であるといえる。しかしながら、全ての金属材料に対してドライ切削が容易にできるわけではない。例えば、アルミニウム合金については工具への溶着の問題があるため、現在広く工場で使われている超硬工具を用いたドライ切削は容易ではない³⁾。

筆者らはこれまでに、水素フリーの Diamond-like Carbon (DLC) コーテッドエンドミルにより、アルミニウム合金 A5052 に対して工具への溶着がほとんど発生せず良好なドライ切削が可能であることを見出した⁴⁾。ここでは水素フリーDLC の効果により長い距離のドライ切削が可能であることを明らかにしている。さらに、エンドミルの切削現象を単純化した二次元断続切削試験法を考案し、ドライ下での断続切削中の工具すくい面摩擦係数を評価した⁵⁾。その結果、上述の水素フリーDLC コーテッド工具の摩擦係数は A5052 の断続切削時に初期の高い値から切削の進行に伴い低下し、超硬工具や水素含有 DLC コーテッド工具よりも低くなることを見出した。切削中の摩擦係数が低いことが、ドライでの A5052 のエンドミル切削で溶着が発生せず良好な加工面が得られる要因であると考えている。一方で同じ水素フリーDLC を用いても、アルミニウム鋳物 AC2A の旋削

加工についてはドライでは溶着の発生により良好な切削ができないことも分かっている⁶⁾。このことから、アルミニウム合金の種類や切削形態によってドライ切削中の DLC コーテッド工具の摩擦特性が異なる可能性があると考えられる。

そこで本研究では、水素フリーDLC コーテッド工具による各種アルミニウム合金ドライ切削時の摩擦特性と溶着発生の有無について明らかにすることを目的とした。既報で A5052 の断続切削について行った二次元切削実験を、アルミニウム合金の種類を増やして断続及び連続切削について行った。工具すくい面の摩擦係数や工具への溶着発生の有無について DLC コーテッド工具と超硬工具を比較し、DLC コーテッド工具が良好なドライ切削性能を発揮する条件を明らかにした。さらに、アルミニウム合金のドライ切削において工具への溶着を防止するために必要なコーティング膜の性能を明らかにした。

2. 実験方法及び解析方法

2.1 実験方法

旋盤を用いた二次元切削実験を行った。図 1 に、実験装置の概略図を示す。本装置では、被削材の端面をバイトで切削することにより二次元切削を実現している。用意した被削材の形状及び特徴については次節に示す。バイトホルダを切削動力計（キスラー製 9121）に固定し、切削中の切削抵抗を測定した。切削条件は切削速度 150 m/min、切り取り厚さ 0.05 mm（旋盤の送り

Fig.1 Schematic view of experimental setup

* 原稿受付 平成 26 年 6 月 30 日

掲載決定 平成 26 年 12 月 15 日

** 正 会 員 神奈川県産業技術センター（神奈川県海老名市下今泉 705-1）

*** 正 会 員 芝浦工業大学デザイン工学部（東京都港区芝浦 3-9-14）

Table 1 Chemical compositions except Al and heat treatment conditions of workpieces

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
A5052-H112	0.1	0.13	0.03	0.01	2.5	0.24	0.01
A7075-T6511	0.09	0.13	1.7	0.01	2.5	0.2	5.7
AC2A-T7	5.7	0.48	3.9	0.48	0.15	0.03	0.34
AC8A-T6	12.3	0.24	1.12	0.01	1.28	0.01	0.01

Fig.2 Metal structures of workpiece materials

0.05 mm/rev), 切削油剤を供給しないドライとした。切削時間を断続切削実験で 10 s, 連続切削実験で 5 s とし, 実切削距離が断続切削, 連続切削ともに 12.5 m となるようにした。本研究では各条件で 2 回以上実験を行い, 再現性を確認した。本報ではそれらのうち各条件 1 回の実験データを示す。

工具に市販の超硬合金製チップ (タンガロイ製 TPGN160302-TH10, K 種) を用意し, チップに DLC をコーティングしたものと未コートed のものを実験に用いた。DLC コーティングはフィルタードアーク蒸着法による水素フリーの ta-C (Tetrahedral Amorphous Carbon) である⁷⁾。DLC の膜厚は約 0.3 μm, 膜の硬さは約 70 GPa である。DLC コーティングしたチップと未コートed のチップ 3 枚ずつに対して, 1 枚当たり 2 箇所のすくい面粗さと刃先丸み半径を表面形状測定機 (東京精密製 Surfcom2000SD) により測定した。チップすくい面粗さの平均値は DLC コーテッドチップで $Ra = 0.107 \pm 0.003 \mu\text{m}$, $Rz = 1.030 \pm 0.096 \mu\text{m}$, 未コートチップで $Ra = 0.116 \pm 0.003 \mu\text{m}$, $Rz = 0.951 \pm 0.115 \mu\text{m}$ であった。すくい面粗さのチップ間のバラつきは小さく, コーティング有無による差はほとんどないと考ええる。また刃先丸み半径の平均値は DLC コーテッドチップで $3.32 \pm 0.23 \mu\text{m}$, 未コートチップで $3.05 \pm 0.16 \mu\text{m}$ であった。刃先丸み半径はほぼ DLC の膜厚分 DLC コーテッドチップで増しているが, 実験条件の切り取り厚さ 0.05 mm に対して極めて小さい差であるため, 本研究では刃先丸み半径の大きさの違いは結果に影響しないと考える。工具のすくい角は 5°, 逃げ角は 6° であった。

工具すくい面及び工具断面の観察にはマイクロ스코プ (キーエンス製 VHX-600) 及び走査型電子顕微鏡 (SEM, FEI 製 XL-30Sirion) を用いた。

2.2 被削材

被削材として展伸材 2 種類と鋳物 2 種類の計 4 種類のアルミニウム合金を用意した。表 1 に, 各被削材の Al 以外の化学成分及び熱処理条件を示す。アルミニウム切削では Si を含有する Al-Si 合金切削時の工具摩耗が問題となる場合がある。特に Si をおよそ 15 % 以上含む過共晶 Al-Si 合金では, 板状の初晶 Si が著しい工具摩耗を引き起こすことが報告されている^{8)~10)}。そのため, 過共晶 Al-Si 合金に対しては, 極めて膜厚の小さい DLC

Fig.3 Shapes of workpieces: (a) for A5052, A7075 and AC8A in intermittent cutting tests, (b) for AC2A in intermittent cutting test, (c) for A5052 and AC2A in continuous cutting tests **Fig.4** Example of cutting forces generated during cutting of a machining part in the intermittent cutting test

では切削時にコーティングが容易に剥離してしまうことが予想された。そこで本研究では過共晶 Al-Si 合金を対象せず, 初晶 Si のほとんど存在しない亜共晶 Al-Si 合金である鋳物の AC2A と共晶 Al-Si 合金である鋳物の AC8A, 及び Si をほとんど含有しない展伸材の A5052 と A7075 を用いることとした。図 2 に, 実験で使用した被削材の組織写真を示す。組織観察には光学顕微鏡 (ニコン製マイクロフォト FXL-UNR) を用いた。AC2A と AC8A には針状の共晶 Si が分布しており, その量は AC8A のほうが多いことが分かる。また AC8A には板状の初晶 Si も僅かに存在する。一方 A5052 と A7075 には, 鋳物の Si 粒子のような大きな結晶は存在しないことが確認できる。

図 3 に, 被削材の形状を示す。断続切削には 4 種類全ての被削材を供試し, 図 3 (a), (b) に示すように幅 5 mm, 中心線部分の弧の長さ約 9.4 mm の凸部 (以下, 切削部) が約 9.4 mm 間隔 (切削部と同一の長さ) で円周状に配置された形状に加工した。AC2A については準備した材料の形状の関係で図 3 (b) の形状とし, 他の被削材については図 3 (a) の形状とした。また連続切削には A5052 と AC2A を供試し, 図 3 (c) に示す幅 5 mm の筒状に加工した。

2.3 解析方法

実験では切削中の切削抵抗を測定した。本研究では, 測定した切削抵抗の主分力 (F_c) と背分力 (F_t), 及び工具すくい角 (γ) から式 (1) により切削中の工具すくい面の摩擦係数を算出した。

$$\text{摩擦係数} = \frac{F_c \sin \gamma + F_t \cos \gamma}{F_c \cos \gamma - F_t \sin \gamma} \quad (1)$$

Fig.5 Variation of friction coefficient during intermittent cutting

Fig.6 Images of tool surface after intermittent cutting (Left : DLC, Right : Carbide)

式 (1) を用いるには切削時に連続型の切りくずが排出されていることが前提となるが、本研究では全ての条件で連続型の切りくずが排出されており、式 (1) が成り立つと考える。また、工具すくい角を 5° として摩擦係数を算出するが、切削中の工具に構成刃先が生成された場合はすくい角が変化している可能性がある。一般的に構成刃先により工具すくい角は増大することが知られており、工具すくい角が増すと式 (1) の摩擦係数は大きくなる。従って、工具すくい角を 5° として式 (1) により算出した摩擦係数は、構成刃先が生成されていないと仮定した場合のその条件における最も低い値と考えることができる。切削後に採取した切りくずの工具すくい面との摩擦面に光沢があれば、構成刃先は生成されていないと分かる¹¹⁾。一方、切りくずの摩擦面に光沢がなく荒れている場合は工具すくい面に溶着が発生したことを知ることができるが、その溶着物が構成刃先として作用し工具すくい角を何度に増大させたかまでは分からない。ただし、既報において工具すくい角を 5° として式 (1) により算出した摩擦係数が低い値のときは切りくずの摩擦面に光沢があり、高い値のときは切りくずの摩擦面が荒れていたため、摩擦係数の高低と溶着発生とが関連することを確認している⁹⁾。そのため本研究では、式 (1) で工具すくい角を 5° として算出した摩擦係数を評価することで工具への溶着発生状況を検証し、摩擦係数が低く溶着の発生しない切削が可能な条件を明らかにすることとする。

連続切削については、測定した切削抵抗のデータから直接摩擦係数を算出し、摩擦係数変化を求めた。断続切削については、切削している時間と切削していない時間とが存在するため、摩擦係数変化を次のようにして求めた。図 4 に、断続切削中の一つの切削部を切削している間の切削抵抗変化の一例を示す。工

具が切削部に接触してから 1 ms 程度までに切削抵抗が上昇する過渡区間があり、約 1.5 ms からほぼ定常状態に入る。加工終了時間は約 3.7 ms であった。そこで断続切削については、一つの切削部を切削している時間のうち 1.5~3.5 ms の間の主分力と背分力の平均値を算出し、これらの値から摩擦係数を求めることとした。切削開始から 1 s までは 0.1 s 毎に、1 s 以降は 0.5 s 毎に摩擦係数を求めた。

3. 実験結果

3.1 断続切削

3.1.1 摩擦係数

図 5 に、断続切削における工具すくい面摩擦係数の変化を被削材毎に示す。A5052 と A7075 に対しては、DLC コーテッド工具では摩擦係数が切削初期の高い値から切削の進行に伴って低い値に変化した。一方、超硬工具では切削初期から高い値のまま推移した。これに対し AC2A と AC8A に対しては、DLC コーテッド工具では切削初期の高い値のまま推移し、超硬工具でも同様に高い値で推移した。DLC コーテッド工具と超硬工具の摩擦係数は、AC2A に対しては同程度であり、AC8A に対しては DLC コーテッド工具のほうが僅かに低かった。

以上から、既報で見出していた DLC コーテッド工具による A5052 の断続切削中に摩擦係数が低下する現象は、A7075 においても現れることが明らかになった。一方 AC2A 及び AC8A の鋳物については摩擦係数が低下する現象は認められなかった。このことから、切削の進行に伴って摩擦係数が低下するのは展伸材の場合のみであることが明らかになった。

3.1.2 工具すくい面

図 6 に、断続切削終了後の工具すくい面と切れ刃方向から見

Fig.7 Variation of friction coefficient during continuous cutting

Fig.8 Images of tool surfaces after continuous cutting (Left : DLC, Right : Carbide)

た逃げ面の観察像を示す。図から DLC コーテッド工具については、A5052 と A7075 の場合には工具すくい面に薄く溶着がある程度だが、AC2A と AC8A の場合には明らかな溶着が認められた。超硬工具については、A7075 以外の被削材においては図から明らかな溶着が認められた。A7075 の場合の超硬工具については、SEM で観察したところ溶着が認められた。すなわち、超硬工具で断続切削した場合には、いずれの被削材についても溶着が発生することが分かった。

3.2 連続切削

3.2.1 摩擦係数

図 7 に、連続切削における工具すくい面摩擦係数の変化（最初の 7.5 m）を被削材毎に示す。A5052 に対しては、DLC コーテッド工具と超硬工具ともほぼ同程度の高い摩擦係数で推移し、ある距離切削が進行したのち値が大きく乱れ始めた。摩擦係数が乱れたときの切削抵抗は大きく振動しており、主分力や背分力が負の値になることもあった。そのため、式 (1) による計算値である摩擦係数が 0 以下となってしまうことがあったが、連続した切りくずが生成されていたこの条件において、実際の摩擦係数が 0 以下になることは考えられない。従って、図 7(a) の摩擦係数が乱れ始めた後の値は実際の摩擦係数を表していないと考えられる。しかしながら、摩擦係数が大きく乱れたのは次節で示す工具すくい面への著しい溶着の発生が原因であると考えられ、図 7(a) により著しい溶着の発生したタイミングを知ることができる。摩擦係数が乱れ始めた切削距離は DLC コーテッド工具で 1.8 m、超硬工具では 1 m であったことから、DLC コーティングに溶着の発生するタイミングを遅らせる効果があるこ

Fig.9 Variation of friction coefficient during cutting with DLC-coated tool that was once used for intermittent cutting of A5052 (a) intermittent cutting of A5052, (b) continuous cutting of A5052, (c) intermittent cutting of AC2A

とが認められる。ただし、その差は僅かであり、溶着発生を防止することはできないことが分かった。AC2A に対しては、DLC コーテッド工具と超硬工具ではほぼ同様の摩擦係数の変化を示し、いずれも高い値で推移した。

以上から、連続切削では展伸材に対して DLC コーティングにより僅かに溶着発生を遅らせることができるものの、展伸材、鋳物のいずれの被削材に対しても溶着を防止することはできないことが明らかになった。

3.2.2 工具すくい面

図 8 に、連続切削終了後の工具すくい面と切れ刃方向から見た逃げ面の観察像を示す。図から、DLC コーテッド工具と超硬工具ではいずれの被削材でもほぼ同様の著しい溶着が確認された。溶着の仕方や範囲も同程度であった。従って、このことから連続切削では溶着防止に関する DLC コーティングの効果はほとんど無いことが確認された。

3.3 断続切削後の DLC コーテッド工具を用いた切削実験

図 5 に示したように、新品の DLC コーテッド工具により A5052 や A7075 の展伸材を断続切削して数 m 進行すると摩擦係数が低下して安定することが明らかになった。そこで次に、一度 A5052 を断続切削して摩擦係数が低下した工具を再び切削に利用した場合にどのような摩擦特性となるかを調べた。

実験に使用した工具はあらかじめ A5052 を 10 s 断続切削した DLC コーテッド工具である。新品の DLC コーテッド工具により A5052 を断続切削したときの摩擦係数変化は図 5(a) に示したものと同様であった。工具すくい面の観察のために断続切削後にチップを一度バイトホルダから取り外している。再度バイトホルダにチップを装着するまでに、切削に使用したチップ表面には全く触れないように注意した。

図 9(a) に、一度 A5052 を断続切削した DLC コーテッド工具を用いて再び A5052 を断続切削したときの摩擦係数変化を示す。図より、A5052 を断続切削して摩擦係数が低下した DLC コーテッド工具では、時間を空けて再度断続切削したときには摩擦係数が低い状態から切削を始めることができることが分かる。従って、断続切削に使用して新品工具のときよりも摩擦係数が低下した状態が切削を中断した後も維持されることが明らかにな

った。既報では、断続切削により摩擦係数が低下した状態では DLC コーティングの最表面の炭素の結合状態が新品時から変化していることを明らかにしている⁹⁾。このことが摩擦係数の低い状態と関連するかは明らかにできていないが、DLC コーティングに変化が生じることにより摩擦係数が低下することは、図 9 (a) の結果から明らかになったといえる。このことから、断続切削によって新品時より摩擦係数が低下した DLC コーテッド工具を用いれば、溶着が発生していた A5052 の連続切削や AC2A の断続切削に対しても溶着が発生せずに切削ができるのではないかと考えた。そこで次に、一度 A5052 を断続切削した DLC コーテッド工具を用いて、A5052 の連続切削と AC2A の断続切削を行った。

図 9 (b) に、一度 A5052 を断続切削した DLC コーテッド工具を用いて A5052 を連続切削したときの摩擦係数変化を示す。摩擦係数は切削距離 6 m で大きく乱れ始めた。このことは工具すくい面に著しい溶着が発生したことを表している。しかしながら摩擦係数の初期値は 0.4 程度の低い値であり、摩擦係数が乱れ始める距離は新品の工具を用いて切削した場合の 1.8 m (図 7 (a)) よりも長くなった。従って、切削前の DLC コーテッド工具すくい面の摩擦係数が低い状態にあることが、A5052 連続切削時の溶着抑制に効果があることが分かった。

続いて図 9 (c) に、一度 A5052 を断続切削した DLC コーテッド工具を用いて AC2A を断続切削したときの摩擦係数変化を示す。図から、切削開始時の摩擦係数はやや低い値であるが、すぐに値が増大していることが分かる。値が増大したあとの変化は新品の工具を用いた場合 (図 5 (c)) と同様であった。このことから、切削のごく初期の段階から工具すくい面に溶着が発生したと考えられる。以上のように、AC2A の断続切削に関しては溶着発生タイミングが新品の DLC コーテッド工具を用いた場合より明確に遅くなることはないことが分かった。

4. 考 察

実験結果から、DLC コーテッド工具によるドライ切削では、展伸材の断続切削の場合のみ切削の進行に伴って摩擦係数が低下して低い値で安定し、ほとんど工具に溶着が発生しない切削が可能であることが明らかになった。表 2 に、切削時の著しい溶着の発生有無をまとめた。切削時に DLC コーテッド工具への溶着が発生した条件は A5052 の連続切削、AC2A の断続切削及び連続切削、AC8A の断続切削の 4 条件であった。ここでは、これらの溶着が発生した原因を検証し、溶着防止に必要なコーティング膜の性能について考察する。

溶着が発生した 4 条件について、切削後の工具すくい面の DLC コーティングの状態を調べた。水酸化ナトリウム水溶液に工具を 8 h 浸漬して大部分の溶着物を除去したのち、工具すくい面を SEM により観察した。図 10 に、溶着物を除去した工具のすくい面の SEM 観察像を示す。図より、溶着が発生した 4 条件全てにおいて DLC コーティングが剥離していることが分かった。A5052 の連続切削後の工具では工具先端と先端から 200 μm 程度間を空けたすくい面上に剥離が見られた。その他の工具では工具先端に剥離が集中していた。コーティングの剥離した位置は、図 6、図 8 に示した溶着発生箇所とほぼ一致する。従って、DLC コーティングが剥離して超硬が剥き出しになった部分が溶着発生の起点となっている可能性があると考えられる。そこで次に、DLC コーティングが剥離した原因について検討した。

図 2 に示した被削材の組織写真の通り、AC2A と AC8A には

Table 2 existence or non-existence of large adhesion on the tool after cutting

		A5052	A7075	AC2A	AC8A
intermittent cutting	DLC	non	non	existence	existence
	carbide	existence	existence	existence	existence
continuous cutting	DLC	existence	-	existence	-
	carbide	existence	-	existence	-

Fig.10 SEM images of DLC-coated tool surfaces

- (a) after continuous cutting of A5052,
(b) after intermittent cutting of AC2A,
(c) after continuous cutting of AC2A,
(d) after intermittent cutting of AC8A

共晶 Si が分散している。これらの被削材を切削する場合、切りくずが工具すくい面と擦過する際に共晶 Si が DLC コーティングを剥離させていた可能性が考えられる。図 9 (c) に示したように、一度 A5052 を断続切削して摩擦係数が低下した DLC コーテッド工具を用いて AC2A を断続切削したとき、切削開始後瞬時に摩擦係数が増大し、溶着が発生した。このことから、AC2A では DLC コーテッド工具の切削開始時の摩擦係数に関わらず、共晶 Si により DLC コーティングが剥がされてしまうため溶着が発生したことが伺える。DLC コーティングが剥離させられてしまう原因は Si が硬い結晶であるための引っ掻き作用 (アブレシブ作用) であると考えられる。過去の研究では、過共晶 Al-Si 合金に多く含まれる板状の初晶 Si のアブレシブ作用により超硬工具の摩耗が促進されるという報告が多くあった^{8)~10)}。しかしながら本研究で用いた DLC コーティングでは、針状の共晶 Si によってもアブレシブ作用によりコーティングの剥離が生じることが明らかになった。このことから、Si を含有するアルミニウム鋳物のドライ切削において、DLC コーティングの剥離を防止し溶着を抑制することは困難であると考えられる。

一方、A5052 や A7075 には鋳物で見られるような結晶組織はない。そのため、切りくずが工具すくい面を擦過する際に硬い結晶によって DLC が剥離するとは考えにくい。仮に硬い結晶により DLC が剥離したのだとすると、断続切削の場合には DLC が剥離して溶着が発生することがなかったことも説明がつかない。従って、A5052 の連続切削については DLC コーティングの剥離に対して別の原因があると考えられる。

図 9 (b) に示したように、一度 A5052 を断続切削して摩擦係数が低下した DLC コーテッド工具を再度切削に用いた場合、A5052 の連続切削では溶着の発生するタイミングが新品の工具を用いた場合よりも遅くなった。このことから、A5052 の連続切削の場合には、瞬時に DLC コーティングに剥離が生じるのではなく、徐々に工具すくい面に変化が生じていったと考えられる。このことを確かめるために、一度 A5052 を断続切削した DLC

Fig.11 Images of DLC-coated tool surfaces after cutting
(a) after intermittent cutting of A5052 for 10 s,
(b) after continuous cutting of A5052 for 1.4 s with DLC-coated tool of (a)

コーテッド工具を用いて A5052 を連続切削する実験を短時間 (約 1.4 s) 行って、切削終了後の工具すくい面の状態を調べた。この実験での切削中の摩擦係数変化は図 9 (b) とほぼ同様であり、切削終了時 (1.4 s) の摩擦係数は約 0.8 で大きな乱れは生じていなかった。

図 11 に、一度 A5052 を断続切削した後の DLC コーテッド工具のすくい面 (連続切削前) の観察写真 (図 11 (a)) と、その工具を用いて A5052 を約 1.4 s 連続切削した後の工具すくい面の観察写真 (図 11 (b)) を示す。図から、断続切削時に発生した溶着が連続切削時に消失して、刃先に近い部分に新たに溶着が発生しつつあることが分かる。ただし、工具先端から約 100 μm の範囲には溶着はまだそれほど発生していない。この工具先端に近い部分の SEM 観察像を図 12 に示す。工具先端に僅かに DLC コーティングの剥離が認められるが、図 10 (a) に示したような広範囲の剥離は生じていないことが分かる。従って、A5052 の連続切削の場合には、DLC コーティングの剥離が切削開始後瞬時に発生するのではないことが確認された。

図 13 に、図 11 (b) に示した工具の先端に近い部分の断面の SEM 観察像を示す。図より、基材の超硬の上に DLC が残存していることが分かる。SEM 観察像より膜厚を測定したところ、約 240 nm であった。この値は切削に使用する前の DLC の膜厚と同程度である。このことから、A5052 の連続切削により DLC コーティングが徐々に摩耗していき消失したのではなく、図 12 に示した工具先端部の剥離が切削の進行に伴って拡大し、溶着が発生していた可能性があると考えられる。断続切削と連続切削の相違点として切削温度の違いが考えられるため、連続切削における工具先端の剥離は切削温度が高いために発生したのではないかと推察する。すなわち、本研究で用いた DLC コーティングの耐熱温度以上に工具先端の温度が上がり、コーティングと工具との密着性が低下していた可能性があると考えられる。しかしながら、本研究の範囲でそのことを確かめるのは困難であるため、今後切削温度の測定や切削シミュレーションにより刃先温度を評価し、連続切削における DLC コーティングの剥離を検証したい。本研究では、A5052 の連続切削に対して溶着を抑制するためのコーティング膜の性能として、①新品の DLC コーテッド工具よりも摩擦係数の低い状態 (例えば本研究で行ったように、一度 A5052 の断続切削をすることにより摩擦係数が低下して安定した状態) にすること、②工具先端の DLC コーティングの剥離を防止すること、が必要であることが分かった。ただし、連続切削においては切れ刃と被削材とが常に接触しているため、通常のドライ切削では切削温度の上昇を抑制することが困難であり、工具先端のコーティング剥離を防止することは難しいと考えられる。そのため、ドライ下で展伸材の連続切削を行うためには、切れ刃と被削材が常に接触している状態を避けた別の切削方法を検討する必要があると考える。例えば振動切削やロータリ工具による切削法が有効である可能性がある

Fig.12 SEM Images of DLC-coated tool surfaces after continuous cutting of A5052 for 1.4 s (tool shown in Fig.11 (b))

Fig.13 SEM Images of DLC-coated tool cross-section surface after continuous cutting of A5052 for 1.4 s (tool shown in Fig.11 (b))

と考えられ、今後これらの切削法によるアルミニウム合金のドライ切削について検討する予定である。

5. 結 言

本研究では、水素フリーDLC コーテッド工具による各種アルミニウム合金のドライ切削時の摩擦特性と溶着発生有無を明らかにすることを目的とした。アルミニウム合金の展伸材 (A5052, A7075) と鋳物 (AC2A, AC8A) に対して、断続及び連続切削実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) DLC コーテッド工具によるドライ切削では、展伸材の断続切削のみ、切削中の摩擦係数が低下して安定し、工具への溶着が発生しない切削が可能であった。展伸材の連続切削や鋳物の切削ではDLC コーテッド工具でも摩擦係数が高く、工具に著しい溶着が発生した。
- (2) 被削材が鋳物 (亜共晶 Al-Si 合金、共晶 Al-Si 合金) の場合、断続、連続切削に関わらず、被削材に含まれる共晶 Si の引っ掻き作用 (アブレシブ作用) により、切削開始後瞬時に DLC コーティングが剥離し、溶着が発生した。
- (3) 展伸材の連続切削の場合、切削温度が上昇することにより工具先端に生じた DLC コーティングの剥離が切削の進行に伴って拡大していき、溶着が発生すると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 井川正治, 岩坪正隆, 宮崎国利: 環境対応のためのドライ加工への取組み, 機械技術, **47**, 5 (1999) 18.
- 2) 富麻昭次郎, 大森茂俊, 小久保邦雄, 立野昌義: LCA 手法を用いた環境対応加工の環境負荷評価—環境対応旋削加工における二酸化炭素排出量—, 精密工学会誌, **69**, 6 (2003) 825.
- 3) G. List et al.: Wear Behaviour of Cemented Carbide Tools in Dry Machining of Aluminium Alloy, *Wear*, **259** (2005) 1177.
- 4) 横田知宏, 吉田健太郎, 横内正洋: DLC 膜種の違いによるアルミニウム合金の切削性への影響, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2011) 211.
- 5) T. Yokota, et al.: Frictional Properties of Diamond-like Carbon Coated Tool in Dry Intermittent Machining of Aluminum Alloy, *Precision Engineering*, **38** (2014) 365.
- 6) 横田知宏, 澤武一, 横内正洋: アルミニウム合金の旋削加工における DLC 膜とアルコールミストの組み合わせの効果, 精密工学会誌, **78**, 9 (2012) 777.
- 7) H. Takikawa, K. Izumi, R. Miyano, T. Sakakibara: DLC Thin Film Preparation by Cathodic Arc Deposition with a Super Droplet-free System, *Surf. Coat. Technol.*, **163-164** (2003) 368.
- 8) 財満鎮雄, 北村利昭: アルミニウム-珪素系合金の正面切削に関する研究, 精密機械, **36**, 9 (1970) 602.
- 9) 財満鎮雄, 鈴木康夫, 山田茂, 鈴木正志, 橋岡浩: 過共晶 Al-Si 合金切削における工具摩耗について, 軽金属, **33**, 3 (1983) 123.
- 10) 渡邊政嘉, 吉川昌範: ダイヤモンドコーティング工具による過共晶 Al-24%Si 合金の切削, 精密工学会誌, **56**, 12 (1990) 2237.
- 11) 中山一雄, 上原邦雄: 新版 機械加工, 朝倉書店, (1997) 31.