研究論文

粒子強化アルミニウム基複合材料切削時の焼結工具の
摩耗と工具および被削材中の粒子硬さとの関連性

長谷川 正*・三浦 恒正**・西脇 信彦*

Relation between wear of sintered tools and particle hardness in tools and
work materials during cutting of particle strengthened aluminum composites

Tadashi HASEGAWA*, Tsunemasa MIURA** and Nobuhiko NISHIWAKI*

Mechanically alloyed ceramic particles (Si, AlN, Al_2O_3 or SiC; $0.4\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ in diameter; 15 vol%)/aluminum composite were machined by dry turning using sintered tungsten-carbide tools and sintered diamond ones with different contents of Co as a binder. In both kinds of tools, the tool wear was uniquely related to the cutting distance, and its amount did not depend on the content of Co. Despite such an apparent similarity in the wear behavior for both kinds of tools, the amount of wear in the latter tools was much smaller than that in the former ones. The main factor determining the amount of tool wear was not the macroscopic (average) hardness of tools and alloys, but the hardness of ceramic particles involved in them; tool wear and hence cutting resistance decrease remarkably in case that the particle hardness in tools exceeds that in work materials.

Keywords: tool wear, cutting resistance, aluminum-ceramic particle composites, sintered carbide and diamond tools, turning test

(Received March 25, 1994)

1. 緒 言

メカニカルアロイング (以下 MA と呼ぶ) 法によって作製したアルミニウム-セラミック粒子複合材料を超硬工具 K10 を用いて切削するときの工具の摩耗形態は主として硬質セラミック粒子によるアブレシブ摩耗であり, 粒子の硬さが増すほど摩耗が激しく起こることを著者らは前報¹⁾で報告した。このことは, 母相の変形能^{2),3)} (延性あるいはそれと逆の関係にある硬さ) のみならず, 被削材である複合材料と工具のマクロ的 (平均的) 硬さあるいはそれらに含まれるセラミック粒子の硬さもまた工具摩耗に影響することを示唆している。しかし, 現在のところ, いずれの硬さがその主たる支配要因であるかは不明である。

本研究では, この点を明らかにする目的で, MA 法によってサブミクロン直径の種々のセラミック粒子をアルミニウム母相中に均一に分散させた粒子強化複合材料について, バインダである Co の量を変えて焼結した数種類の焼結 WC 工具および焼結ダイヤモンド工具を用いて切削実験を行った。

2. 実験方法

被削材は, 前報¹⁾で用いたと同様の, 直径 $0.4\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$ のセラミック粒子 (Si: ピッカース硬さ $\text{HV}=\sim 1000^4)$, AlN: $\sim 1225^5)$, Al_2O_3 : $\sim 2720^6)$ あるいは SiC: $\sim 3500^5)$ を 15 vol% 含むアルミニウム基 MA 合金である。以下, たとえば Al_2O_3 粒子を含む場合には MA Al-15 Al_2O_3 (本文中では 15 Al_2O_3 材) と略記する。比較のため, 純アルミニウム粉末のみを MA して得た合金 (MA Al) も併せて実験に供した。なお, いずれの材料のアルミニウム母相中にも, MA 処理中にプロセス制御剤として添加したエタノールと Al との反応によって形成された Al_2O_3 および Al_4C_3 粒子 ($\sim 35\text{ nm}$ 直径) が約 7.5 vol% 含まれている⁷⁾, これらの微細な粒子の工具摩耗への影響は MA 時に複合したサブミクロン直径の大きなセラミック粒子による影響に比べて小さいことは K10 工具についてすでに確認されている⁸⁾。

切削実験は旋盤による長手旋削によった。用いた工具は, WC あるいはダイヤモンドの粉末をバインダである Co の量を変えて焼結した, それぞれ 3 種類の焼結 WC

* 東京農工大学工学部機械システム工学科 (東京都)。Dept. of Mech. Eng., Tokyo Univ. of Agri. & Tech. (Koganei-shi, Tokyo)。

** 東京農工大学大学院 (東京都) [現在: 昭和アルミニウム(株), 技術研究所 (小山市)]。Graduate Student, Tokyo Univ. of Agri. & Tech. (Koganei-shi, Tokyo) [Present: Showa Aluminum Co., Research Lab., (Oyama-shi, Tochigi)]。

Table 1 Tool materials, geometry of cutting part and cutting condition

tool material (mass%)	HV of tool	dia. of particle in tool (μm)	HV of particle in tool	geometry of cutting part	cutting condition
sintered WC+16%Co WC+ 8%Co WC+ 6%Co(K10)	~ 900 ~ 1300 ~ 1700	~ 3 2-3 1-2	$\sim 2400^{(9)}$	(5, 0, 6, 15, 45, 45, 0.2 mm)	depth of cut $a=0.3 \text{ mm}$ feed $S=0.1 \text{ mm/rev}$
sintered diamond+8%Co diamond+5%Co diamond+3%Co	~ 7000 ~ 8000 ~ 9000	~ 8 ~ 25 ~ 44	$> \sim 9000^{(10)}$	(5, 0, 6, 15, 45, 45, 0.8 mm)	cutting speed $V=0.33\text{--}3.33 \text{ m/s}$

Table 2 Symbols representing tool material and cutting speed

tool material (mass%)	$V \text{ (m/s)}$			
	0.33	0.83	1.67	3.33
WC+16%Co or diamond+8%Co	□	■	▣	■
WC+ 8%Co or diamond+5%Co	○	●	◐	●
WC+ 6%Co(K10) or diamond+3%Co	△	▲	▴	▲

工具と焼結ダイヤモンド工具である。Table 1 には、工具の詳細と切削条件を示す。工具摩耗の測定は光学顕微鏡 (OM) および走査型電子顕微鏡 (SEM) によった。15Al₂O₃ 材の K10 工具による切削では工具摩耗に対して切削油剤の効果がほとんど認められなかった⁸⁾ ので、切削はすべて乾式で行った。切削抵抗の測定には圧電効果を利用した水晶式切削動力計を用いた。なお、本論文では、記号の意味を特に図中に示さない限り、工具材質と切削速度に対して Table 2 の記号を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 焼結 WC 工具の摩耗と切削抵抗

いずれの被削材の場合も工具摩耗は横逃げ面で最も激しく生じたため、本研究では主として横逃げ面の最大摩耗幅 VB をもって工具摩耗の程度を評価した。なお、切込みをいったんセットした後の連続切削中の刃先後退量は最大でも 0.02 mm 程度であり、これは切込み量 0.3 mm に比べてはるかに小さい。また、切削中、すくい面と逃げ面の摩耗および刃先の後退によって工具刃先の形状は変化するが、前報¹⁾ で述べたように切れ刃稜は鋭利なままであった。したがって、切削条件および切りくず生成のための切削力を含めた切削過程そのものは工具摩

Fig. 1 Relation between width of flank wear VB and cutting distance L in dry cutting by sintered carbide tools.

耗によって大きくは変化していないものと考えられる。

Fig. 1 および Fig. 2 はそれぞれ 3 種類の焼結 WC 工具で切削したときの VB および切削抵抗の主成分 F_v の切削距離 L に対する変化を MA Al, 15AlN 材および 15Al₂O₃ 材について示す。図が煩雑になるのを避けるため、15Si 材と 15SiC 材の結果はあえて示さないが、前者は MA Al と 15AlN 材の中間に、後者は 15Al₂O₃ 材とはほぼ同レベルに位置していた。すなわち、VB と F_v のいずれも、同一の L に対しては MA Al < 15Si 材 < 15AlN 材 < 15Al₂O₃ 材 $\approx$ 15SiC 材の順に大きくなった。

Co 量が多い場合ほど VB も大きくなる傾向は認められるもののその程度は小さく、3 種類の工具の VB- L 曲線 (Fig. 1) および F_v - L 曲線 (Fig. 2) が同一の被削材に対してほぼ 1 本に重なることから、工具摩耗および切削抵抗の増加が焼結 WC 工具中の Co 量にはほとんど依存しないことがわかる。また、VB および F_v はいずれも切削速度に関係なく L によってほぼ一義的に定まり、

Fig. 2 Relation between principal force F_v and cutting distance L in dry cutting by sintered carbide tools.

それらの増加率はセラミック粒子が硬い場合ほど大きい。さらに、刃先の摩耗形態に3種類の工具で大きな差異は認められなかった。これらのことは、前報¹⁾で検討した K10 工具 (WC+6 mass%Co) の場合と同様 Co 量を 8 あるいは 16 mass% に増した工具においても、摩耗は主にセラミック粒子によるアブレシブ摩耗によって起こり、主分力の増加は主として工具逃げ面の摩耗による摩擦力の増加に起因することを示している。

なお、K10 工具について前報¹⁾でみたように背分力 F_p も送り分力 F_f も工具摩耗の進行に伴い増加したが、 F_v の場合と同様、同一の被削材に対しては工具中の Co 量にほとんど依存せず、 L によってほぼ一義的に定まり、それらの増加率は被削材中のセラミック粒子が硬い場合ほど大きかった。また、15Al₂O₃ 材を切削したときのように工具摩耗が大きいときには $F_p > F_v$ となるが (Fig. 8 参照)、このことが通常の溶解・鋳造法による、展伸材を含めたアルミニウム合金の切削時⁹⁾と異なり特徴的なことであった。

3.2 焼結ダイヤモンド工具の摩耗と切削抵抗

前節でみたように、Al₂O₃ 粒子あるいは SiC 粒子を含む材料を WC 粒子を主成分とする焼結 WC 工具で切削する場合には、工具摩耗の増加率が著しく大きくなり、それに付随して切削抵抗も増加する。そこで、工具中の WC 粒子 (HV=2400¹⁰⁾) をそれよりもはるかに硬いダイヤモンド粒子 (HV>9000¹¹⁾) に置き換えることによってどの程度工具摩耗ひいては切削抵抗を減少させるかを調べるため、バインダ (Co) の量を変えた3種類の焼結ダイヤモンド工具を用いて切削実験を行った。

焼結ダイヤモンド工具においても十分 OM で検出可能な程度の摩耗が生じた。Fig. 3 および Fig. 4 にはそれぞれ、MA Al, 15AlN 材および 15Al₂O₃ 材を切削したときの横逃げ面摩耗幅 VB と主分力 F_v の切削距離 L に対する変化を示す。刃先のコーナ半径が異なるため厳密

Fig. 3 Relation between width of flank wear VB and cutting distance L in dry cutting by sintered diamond tools.

Fig. 4 Relation between principal force F_v and cutting distance L in dry cutting by sintered diamond tools.

な比較は難しいが、焼結ダイヤモンド工具の VB と F_v は焼結 WC 工具の場合に比べて数分の1程度と小さい。しかし、定性的には焼結 WC 工具でもみられたように、VB と F_v はいずれも被削材に複合するセラミック粒子が硬いほど大きく、同一の被削材に対しては L によってほぼ一義的に定まる。さらに、工具により数倍異なるダイヤモンド粒子径の工具摩耗への影響は現在のところ不明であるが、少なくとも実験した範囲内では工具摩耗は工具中の Co 量が変わってもほとんど変化しない。すなわち、両種工具の摩耗の進行状況は類似している。

焼結ダイヤモンド工具の寿命曲線の一例を、工具がダイヤモンド+8 mass%Co、被削材が 15Al₂O₃ 材の場合について Fig. 5 に示す (寿命判定基準: VB=0.05, 0.08, 0.1 mm)。切削速度 V の対数と寿命時間 T の対数との間には直線関係が成り立ち、直線の傾きから求めたテラーの寿命方程式 ($V \cdot T^n = C$; n, C : 定数) のべき指数 n はほぼ 1 となる。Co 量の異なる他の焼結ダイヤモンド工具についても同様の結果が得られた。この $n \approx 1$ なる事実は、焼結 WC 工具の場合と同様焼結ダイヤモンド工具の摩耗も刃先の温度上昇の影響をほとんど受けない

Fig. 5 Tool life curves in dry cutting of MA Al-15 vol% Al_2O_3 by diamond+8 mass%Co tool (V: cutting speed, T: tool life; standard of tool life: width of flank wear $\text{VB}=0.05, 0.08$ or 0.10 mm).

いことを意味する。しかし、ダイヤモンドがそれよりもはるかに硬さの低いセラミック粒子によってアプレシブ摩耗を受けるとは考えにくい。硬質セラミック粒子の衝突によるミクロ的なチップング¹²⁾が摩耗の主原因とも考えられるが、詳細は現在のところ不明である。

3.3 工具摩耗を支配する要因

Brun ら¹³⁾は40 mass%(~ 37 vol%)のSiC粒子を含む6061アルミニウム合金基複合材料をCo量を変えて焼結した数種類の焼結WC工具を用いて乾式切削し、Co量の増加によって工具のマクロ的硬さをHV=1800から1600に低下させると横逃げ面摩耗幅VBが約3倍程度増加すると報告している。しかし、本実験では、焼結WC工具のマクロ的硬さをさらに広範囲に変化させたにもかかわらず、VBとそれとの間に直接的な関係は認められなかった。このことは、Brunらの用いた切削速度は本実験の場合と同程度であるが、被削材中の硬質セラミック粒子の体積率および切削時の切込みと送り量が2倍以上大きいことに起因するものと思われる。すなわち、彼らの求めた重切削下での工具摩耗には刃先の温度上昇が影響している可能性があり、そのことが彼らと本実験の結果の不一致の原因であろう。一方、VBの増加率は被削材に複合するセラミック粒子の種類に強く依存し、WCよりも硬い粒子を含む材料を切削するときに著しく大きくなった。さらに、Fig. 6に示すように、被削材のマクロ的硬さは複合するセラミック粒子の硬さによってほとんど変化しない。これらの事実、少なくとも本実験の比較的軽切削の下では、焼結WC工具の摩耗が工具あるいは被削材のマクロ的硬さではなく、それらに含まれるセラミック粒子の硬さの相対的大小に強く

Fig. 6 Relation between Vickers hardness HV of alloys and HV of ceramic particles dispersed in alloys. Matrix hardness was taken for the latter in MA Al containing no ceramic particle.

Fig. 7 Width of flank wear VB and backward wear of tool tip ΔX as a function of Vickers hardness HV of ceramic particles in alloys after dry cutting by sintered carbide tools ($V=0.83$ m/s).

依存することを示唆している。

Fig. 7には、3種類の焼結WC工具を用いて切削したときのVBと刃先後退量 ΔX を被削材中のセラミック粒子の硬さの関数として示す。図にみるように、VBと ΔX はいずれもセラミック粒子の硬さが増すほど増加する傾向を示す。さらに、それらの値は、被削材中のセラミック粒子が工具中のWC粒子(HV ~ 2400)より軟らかいか硬いかによって大きく異なり、軟らかい場合(Si: HV ~ 1000 ; AlN: ~ 1225)には小さく、硬くな

Fig. 8 Principal force F_v and thrust force F_p as a function of Vickers hardness HV of ceramic particles in alloys after dry cutting by sintered carbide tools ($V=0.83$ m/s).

ると (Al_2O_3 : ~ 2720 ; SiC : ~ 3500) 急激に増加する。また、図には用いた工具のマクロ的硬さも示したが、バインダとしての Co の量を増して硬さを AlN 粒子あるいは Si 粒子の硬さ以下に下げた工具についても上述の挙動に変化は認められない。したがって、焼結 WC 工具の摩耗を支配する主たる要因は、工具と被削材のマクロ的硬さではなく、工具と被削材中の硬質粒子の硬さの相対的大小であると結論できる。なお、切削抵抗の主分力 F_v と背分力 F_p についても同様の傾向が認められるが (Fig. 8)、このことは切削抵抗の増加が工具摩耗に起因することを明確に示している。

3.2節でみたように、工具中の WC 粒子をさらに硬いダイヤモンド粒子に置き換えることによって、工具摩耗は大幅に減少した。Fig. 9 には、3 種類の焼結ダイヤモンド工具を用いて切削したときの VB と ΔX を Fig. 7 と同じ形式で示す。焼結 WC 工具の場合に大きな工具摩耗を生じた Al_2O_3 あるいは SiC 粒子を含む材料に対しても摩耗量は小さく、同時に切削抵抗も減少している (Fig. 10)。この結果は、工具摩耗の支配要因に関する上記の考え方が正しいことを示している。なお、他のセラミック粒子の場合に比べて Al_2O_3 粒子の場合には工具摩耗が比較的大きく、同時に切削抵抗も増加する傾向が

Fig. 9 Width of flank wear VB and backward wear of tool tip ΔX as a function of Vickers hardness HV of ceramic particles in alloys after dry cutting by sintered diamond tools ($V=0.83$ m/s).

Fig. 10 Principal force F_v and thrust force F_p as a function of Vickers hardness HV of ceramic particles in alloys after dry cutting by sintered diamond tools ($V=0.83$ m/s).

認められるが、現在のところその理由は不明である。

本節では、工具摩耗の支配要因を工具および被削材のマクロ的硬さおよびそれらに含まれる硬質粒子の硬さに注目して検討した。しかし、Table 1 に示したように、バインダである Co の量とともに工具の主成分である硬質粒子の寸法も特にダイヤモンドの場合には大きく変化している。焼結工具による粒子強化複合材料の切削機構ひいては被削性をさらに明らかにするためには、硬質粒

子の寸法さらには工具と被削材の化学的相互作用をも考慮に入れた検討を今後進める必要がある。

4. 結 言

メカニカルアロイング法によって作製した、各種のセラミック粒子 (Si, AlN, Al₂O₃ および SiC ; 直径0.4~1 μm) を15 vol%含むアルミニウム基複合材料を、バインダである Co の量を変えて焼結した、それぞれ3種類の焼結 WC 工具および焼結ダイヤモンド工具を用いて乾式長手旋削し、工具摩耗と切削抵抗を調べた。得られた主な結果と結論は以下のとおりである。

(1) 焼結 WC 工具の摩耗はアブレシブ摩耗によって起こり、その程度はバインダである Co の量にはほとんど依存しない。

(2) 焼結ダイヤモンド工具の摩耗の進行状況は焼結 WC 工具のそれと類似している。摩耗量はこの場合にも工具中の Co 量によってほとんど変化しない。

(3) 焼結工具の摩耗を支配する主たる要因は、工具と被削材のマクロ的 (平均的) 硬さではなく、それらに含まれる硬質粒子の硬さの相対的大小である。工具中の粒子硬さが被削材中のそれを上回るとき、工具摩耗が急激に減少する。

(4) いずれの工具の場合も、切削抵抗の増加は工具摩耗に起因する。

最後に、実験と図面作成に協力された本学学生章 麗萍, 尹 應律および伊坂勝哉の諸君, ならびに複合材料の作製に当たってご支援とご討論をいただいた昭和アルミニウム(株)技術研究所大塚達雄, 福井紘一郎の両氏に感

謝する。本研究の費用の一部は(財)軽金属奨学会に、工具の入手は東芝タンガロイ(株)のご好意によった。付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 長谷川正, 章 麗萍, 三浦恒正, 西脇信彦: 軽金属, **44** (1994), 359.
- 2) 花崎伸作, 峠 睦, 佃 市三: 精密工学会誌, **55** (1989), 1091.
- 3) 花崎伸作, 峠 睦, 田ノ窪栄二, 長谷川嘉雄: 精密工学会誌, **56** (1990), 1877.
- 4) 上田完次, 杉田忠彰: 日本金属学会会報, **21** (1982), 225.
- 5) ファインセラミックス事典編集委員会編: ファインセラミックス事典, 技報堂出版, (1987), 640.
- 6) 富士原由雄: 精密工学会誌, **52** (1986), 1508.
- 7) T. Hasegawa, T. Miura, T. Takahashi and T. Yakou: ISIJ International, **32** (1992), 902.
- 8) 八高隆雄, 三浦恒正, 長谷川正: 精密工学会誌, **58** (1992), 1704.
- 9) アルミニウム技術便覧, 軽金属出版, (1985), 880.
- 10) セラミック材料技術集成編集委員会編: セラミック材料技術集成, 産業技術センター, (1979), 851.
- 11) 瀬高信雄, 難波義捷, 松永正久, 若槻雅男: 人造ダイヤモンド技術ハンドブック, サイエンスフォーラム, (1989), 336.
- 12) J. Wilks and E. M. Wilks: The Properties of Diamond, (ed. J. E. Field), Academic Press, (1979), 351.
- 13) M. K. Brun, M. Lee and F. Gorsler: Proc. of Conf. on Wear of Materials, The Amer. Soc. Mech. Eng., (1985), 539.