

アルミニウム合金穴あけ加工において ta-C:Ta 膜のトライボロジー特性が  
工具の切削性能に及ぼす影響

Influence of tribological properties of ta-C:Ta coatings  
on the cutting properties of coated tools during drilling of aluminum alloys

三菱マテリアル（正）\*鈴木 康介 名大・工（正）野老山 貴行 名大・工（正）梅原 徳次  
名大・工（正）張 鋭璽 三菱マテリアル（非）佐藤 峻 三菱マテリアル（非）油本 憲志

Kosuke Suzuki\*, Takayuki Tokoroyama\*\*, Noritsugu Umehara\*\*, Ruixi Zhang\*\*, Shun Sato\*, Kenji Yumoto\*

\*Mitsubishi Material Corporation

\*\*Nagoya University

1. はじめに

自動車の電動化に伴い、高比強度を有する軽量アルミニウムの加工需要が増加している。DLC（Diamond like carbon）膜は、その優れた表面平滑性、化学的安定性、および高い硬度により、アルミニウム加工において工具寿命を向上させることが可能である。しかし、環境負荷、コスト削減要求に伴う、加工速度の高速化やドライ加工の普及により、工具刃先の温度が上昇し、接着や拡散による摩耗が増加するため、さらなる性能向上が求められている<sup>1)</sup>。DLC へ元素添加は、特定の材料との反応化学的な抑制、高温における耐久性の向上等の効果が報告されている<sup>2)</sup>。我々の先行研究では、Ta 添加 DLC が高温大気中において、通常の DLC と比較して優れた摩擦摩耗特性を示すことが確かめられており、切削工具としての応用が期待されている。一方、アルミニウムに対する摩擦および摩耗特性および切削工具に適応した際の性能評価はまだ調査されていない。本研究では、異なる Ta 含有量を持つ膜を超硬ドリルおよびボールに成膜し、摩擦試験および切削試験を行い、アルミニウム合金加工への適用可能性を検討すると同時に添加 Ta の働き明らかにすることを目的とした。

2. 試験片、実験装置及び実験方法

DLC 膜の成膜には FCVA（Filtered Cathodic Vacuum Arc Deposition）と UBMS（Unbalanced Magnetron sputtering）を組み合わせた装置<sup>3)</sup>を使用した。切削試験用の超硬合金製ソリッドドリルおよびボールオンディスク試験用超硬合金ボールに対して成膜を行った。成膜時の Ta ターゲットに対するのスパッタリング電流および基板バイアス電圧を変化させることで、Ta 含有量および硬度の異なる複数のサンプルを作製した。各被膜の成膜条件および諸特性を Table 1 に示す。摩擦試験は Fig. 1 に示すボールオンディスク試験機を用い、相手材を ADC12 アルミニウム合金ディスクとして湿潤空気（湿度 50 %）、乾燥空気、乾燥窒素および 200℃の高温下で垂直荷重 5 N しゅう動速度 0.157 m/s の条件で行った。切削試験は縦型マシニングセンタを用いて ADC12 アルミニウム合金に対して、一般的な加工条件であるクーラント吹き付け下、切削速度 120 m/min、送り量 0.35 mm/rev において、700 穴加工を行った。

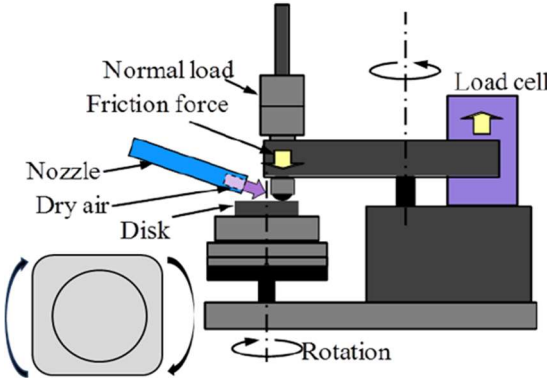


Fig. 1 Ball-on-disk friction tester with gas spray nozzle

Table 1 Deposition Conditions and Coating Properties

	ta-C	ta-C:Ta60	ta-C:Ta100	ta-C:Ta300	ta-C 0V
Sputtering current $I_s$ , mA	0	60	100	300	0
Arc current $I_A$ , A	50	50	50	50	50
Substrate bias $V_s$ , V	100	100	100	100	100
Hardness $H$ , GPa	51	46	38	21	42
Young's modulus $E$ , GPa	652	593	522	491	587
Ta content $C_{Ta}$ , at%	0	1.1	3.5	8.0	0
Coating thickness $t$ , $\mu\text{m}$	414	375	432	373	382

### 3. 実験結果および考察

#### 3・1 摩擦試験

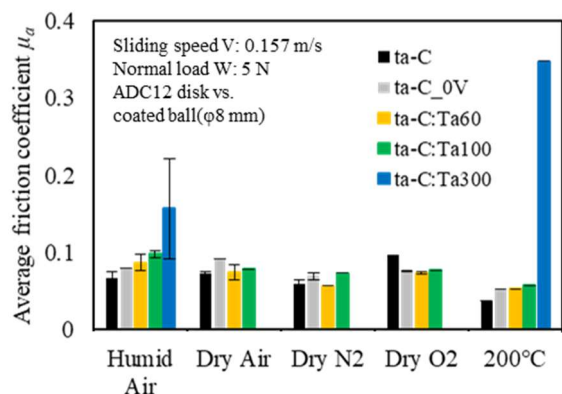


Fig. 2 Average friction coefficient of each sample under each test condition

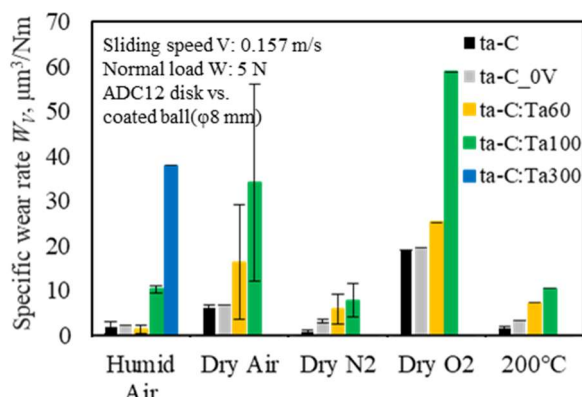


Fig. 3 Specific wear rate of each sample under each test condition

Figure. 2, 3 に各サンプルの定常状態における平均摩擦係数および、比摩耗量を試験条件ごとにまとめた結果を示す。摩擦係数は、多少のばらつきがみられるが膜硬度が上がるほど低下する傾向がみられた。比摩耗量に関しては、まず試験環境の影響に注目した場合、湿潤空気中や乾燥窒素中では比摩耗量が小さい一方で、乾燥空気、乾燥酸素では比摩耗量が増加しており、乾燥酸素中ではすべての膜で比摩耗量が最大となっている。これらの条件においては膜へのアルミの凝着が確認されており主に凝着摩擦によって比摩耗量が増加したと考えられる。一般的に FCVA によって成膜される水素非含有高硬度 DLC (ta-C) は水分子が存在する環境において、表面のダングリングボンドが OH や H によって終端されることが知られ、摩擦係数や相手材との反応性に大きな影響を及ぼすことが報告されている<sup>4)</sup>。低い湿度で凝着が生じやすくなった結果は、そうした環境下において、膜表面のダングリングボンドの不働態化が十分に行われなかった可能性があることを示唆している。また酸素分圧が高いほど凝着が生じやすくなった結果は、摩擦面内におけるトライボケミカル反応により、酸素を介した Al-O-C などの結合が生じることで凝着が増加する可能性があることを示唆している。次に膜特性の影響に注目すると Ta 含有量が高いサンプルほど比摩耗量が増加することが分かる。Ta 含有量が増加するほど膜硬度は低下しており、硬度の影響が大きく表れていると考えられる。一方、硬度の低下以外の Ta 元素の影響を考えるために硬度が同程度の ta-C:Ta60 と ta-C\_0V を比較すると特に乾燥条件下においては Ta を含有する ta-C:Ta60 で凝着が生じやすくなり比摩耗量が高いことが確かめられた。以上より Ta の添加は硬度を減少させるだけでなく表面性状を変化させるなど化学的な観点においてもアルミとの反応性を増加させる可能性があると考えられる。Figure 4 のコーティング表面に対する XPS による組成分析結果から、Ta を添加膜は Ta 含有量の増加に伴って膜表面に結合する酸素が増加することが確かめられた。上述のように凝着が酸素を介して生じると仮定すると、Ta 添加によって膜表面における酸素との反応性が上がったこともアルミとの反応性を増加させ、耐摩耗性悪化に影響した可能性がある。

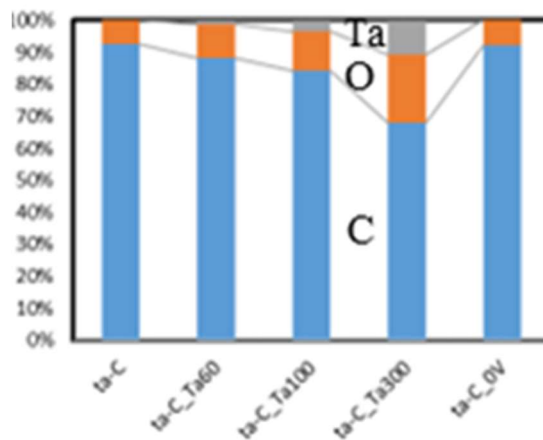


Fig. 4 Surface composition analysis using XPS

#### 3.2 切削試験

Figure5 に 700 穴加工後の各サンプルのすくい面刃先写真を示す。刃先近傍では摩耗により母材が露出していることが確認された。すべてのサンプルの膜厚は同程度であったことから、最も大きく母材が露出した ta-C:Ta300 は耐摩耗性向上効果が最も低く、最も母材の露出が少ない ta-C:Ta60 の耐摩耗性向上効果が最も高いことが分かった。さらに詳細に摩耗状態を確認するため、同一箇所に対して SEM 観察を行ったところ、ta-C 膜では刃先近傍で微小な膜のはく離が多数存在することが確かめられた。一方で最も耐摩耗性が高かった ta-C:Ta60 では微小はく離はあまり観察されなかった(Fig.5)。

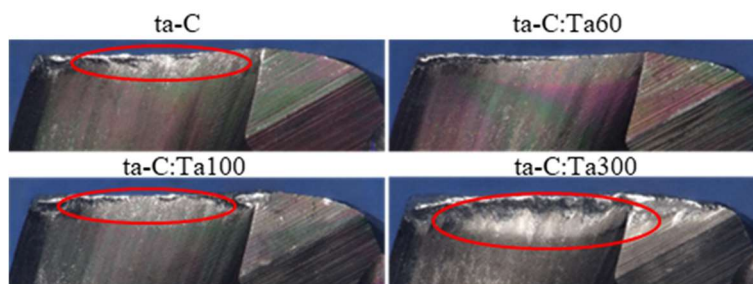


Fig. 5 Drill rake surfaces after drilling 700 holes

摩擦試験では特にドライ環境において Ta 含有膜はアルミとの凝着が生じやすくなり、比摩耗量が増加した一方で切削試験では ta-C:Ta60 が Ta 非含有の膜と比較して、優れた耐摩耗性を示した。以上の結果から以下のことが予測される。①今回の切削試験はクーラント吐出下で行われており、切削中の刃先においても水分による不働態化が十分に行われたため少量であれば Ta を添加したサンプルでも凝着は生じにくかった。（実際湿潤空気下の摩擦試験においては ta-C:Ta60 膜と ta-C 膜いずれも凝着は生じておらず耐摩耗性についてもほとんど差がない。）②切削試験ではより断続的な力がかかることから膜の付着力の影響が強く表れる可能性がある。ta-C:Ta60 は Ta 添加による残留圧縮応力の低減等により付着強度が向上している可能性がある。

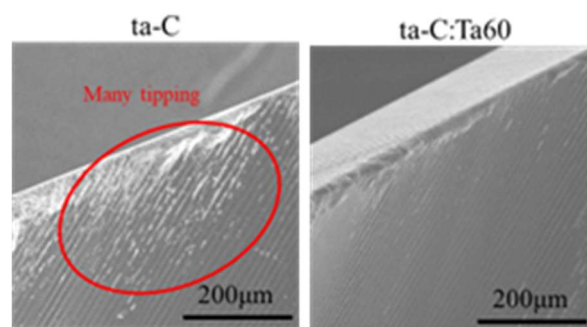


Fig. 6 SEM images of drill rake surface after drilling 700 holes

#### 4. おわりに

本研究では、異なる Ta 含有量を持つ膜を超硬ドリルおよびボールに成膜し、摩擦および切削試験を通じて、アルミニウム合金加工への適用可能性を検討すると同時に添加 Ta の働きを調査した。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 様々な環境下で行った摩擦試験の結果から特にドライ環境下において、Ta 添加はアルミに対する凝着を促進し摩擦摩耗特性を悪化させることが分かった。Ta 添加により膜の硬度が低下することに加えて、表面の酸素との反応性が高まることで凝着の増加、耐摩耗性の低下が生じる可能性が示唆された。
- (2) 同様の膜を用いて行った切削試験では Ta をごく微量含有するサンプルの耐摩耗性が最も良い結果となり、Ta 添加に伴う圧縮応力の緩和に伴う付着強度の増加がチッピングを抑制し耐摩耗性を向上させた可能性があることが示唆された。
- (3) アルミとの反応性を増加させない新しい添加元素の添加および付着強度の向上によってさらに切削性能の向上を期待することが出来る。

#### 文献

- 1) S. Bhowmick et al.: Minimum quantity lubrication drilling of aluminium–silicon alloys in water using diamond-like carbon coated drills, International Journal of Machine Tools and Manufacture Volume 48, Issues 12–13, October 2008, Pages 1429–1443
- 2) X. Liu et al.: Tribological properties of ta-CN<sub>x</sub> coating sliding against steel and sapphire in unlubricated condition, Tribol Int, 131 (2019), pp. 102–111
- 3) T. Tokoroyama, et al.: Tribological property of ta-CN<sub>x</sub>:Ta deposited via ion beam assisted-filtered arc deposition, Tribol Int, 168 (2022), Article 107450
- 4) J. M. Martin et al.: Gas-Phase Lubrication of ta-C by Glycerol and Hydrogen Peroxide. Experimental and Computer Modeling, The Journal of Physical Chemistry C, 2010, vol 114, Issue 11