

技術資料

Technical Data

断続旋削時の工具摩耗におよぼす Al 含有量の影響

大橋亮介*, 山崎歩見*, 井上圭介*

Effect of Al Content on Intermittent Turning Wear

Ryosuke OHASHI, Ayumi YAMAZAKI and Keisuke INOUE

Synopsis

We investigated the influence of Al content on machinability in intermittent turning and the following results were obtained.

- (1) Al addition suppressed the flank wear width of the turning tool.
- (2) Variation of chip formation and chip color with Al content was not observed.
- (3) When Al was added, an Al oxide film was formed on the surface of the turning tool. In 2D intermittent turning, the friction coefficient did not change with an increase of Al content.
- (4) The suppression of flank wear width by addition of Al might be due to improvement of the resistance to adhesion wear and diffusion wear brought about by the increase in stability of the oxide film.

1. 緒言

機械構造用鋼は主に自動車用のエンジン部品、駆動系部品および足回り部品などの機械構造部品に広く使用されている。これらの部品の多くは、鋼材を鍛造や切削により所定の形状に加工した後、適宜熱処理により必要強度を付与する工程を経て製造される。一般に機械構造部品の製造コストに占める切削コストの割合は大きく、製造コストを低減するためには鋼材の切削性を向上させることが有効な手段の一つである。この切削性という言葉には多様な意味合いが含まれ、(1) 工具寿命、工具摩耗 (2) 切削抵抗 (3) 仕上げ面粗さ (4) 切りくず処理性、などの特性に分けられ、加工方法や加工条件、生産環境によって要求される特性も異なる。大量生産ラインに投入されることが多い機械構造用鋼においては、工具寿命が生産性を大きく左右する要素であるため、もっとも重視されることが多い。さらに機械構造部品では、近年の高強度化ニーズの高まりにより、MnS などの強度

に悪影響をおよぼす介在物の低減による高強度化が志向されている。MnS は切削性向上に有効であることが知られており、この MnS 低減により切削性の悪化が懸念される。そのため、MnS 以外を活用した工具寿命の改善が今以上に課題となる可能性がある。これまで、工具摩耗を低減する合金元素として知られている S, Pb, Ca などの添加鋼^{1), 2)}が実用化されている。同様の効果が期待できる元素には、Se, Te, Bi などもある^{3), 4)}。しかしながら、これらの元素は高価であるという課題があり、その上環境問題に対する意識の高まりから有害物質使用削減の動きが活発化しており、使用の削減が求められている。また、切削加工は連続切削と断続切削に大きく分類される。連続切削時の工具摩耗におよぼす合金元素の影響に関しては、これまで数多く報告されている^{2), 5)}ものの、断続切削時の報告例はほとんどない^{6), 7)}。また、断続切削は機械構造部品の製造コスト低減を志向したニアネットシェイプ化の進行により、部品製造における比率が増加傾向である。さらに、断続切削は工具への

2018年10月17日 受付

* 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

負荷が高く、工具寿命、工具摩耗が悪化しやすい切削であることから、重要度が高まっていくと考えられる。先述したように、断続切削時の工具摩耗におよぼす合金元素影響の報告事例はほとんどないが、藤井らは、工具鋼を用いてエンドミルやフライスでの工具摩耗におよぼすSi量の影響について調査している。Si量の増加により断続切削時の工具摩耗が低減されることを報告している⁶⁾。しかし、Si量の増加はフェライト固溶強化により素材硬さを高めるため、例えば、連続切削時の工具摩耗が増加することが予想される。そこで、本研究では、Siと同様に酸化物形成の自由エネルギーが小さく⁸⁾、酸化膜を形成することで工具摩耗を低減すると考えられるAlを選定した。AlはBiなどのように高価な元素ではなく、また、Siに比べて固溶強化量が小さいため、連続切削性への影響が小さいと想定される。Al量に関する切削性への影響の報告事例は連続旋削で工具摩耗に関する報告⁹⁾はあるが、断続切削における報告事例はない。そこで、本稿では、JIS-S40CをベースにAl量を変化させた鋼材を供試材とし、断続旋削時の工具摩耗におよぼすAl量の影響を調査した。また、元素の影響を抽出するために本研究ではS量を極力低減した。

2. 実験方法

2. 1 供試材

本研究で用いた供試材の化学成分をTable 1に示す。JIS-S40Cを基本鋼種とし、Al量を0%から0.1%まで変化させた成分系とした。供試材は高周波誘導炉を用いて真空中で溶解し、150 kg 鋼塊に铸造した後、加熱温度1523 K、仕上げ温度1273 Kの熱間鍛造によって直径74 mmの棒鋼に鍛伸した。この棒鋼に1473 Kの焼ならし処理を施した後、機械加工にてFig. 1に示す直径65 mmの切削試験片を製作した。また、比較鋼としてSi量を0%から1%まで変化させた鋼材も、同様の工程で製造し、評価した。

	0 %Al	0.01 %Al	0.1 %Al		0 %Si	0.2 %Si	1.0 %Si
Microstructure 200 μm				Microstructure 200 μm			
Inclusion 200 μm				Inclusion 200 μm			
Hardness	89.8 HRB	89.4 HRB	88.5 HRB	Hardness	88.2 HRB	89.3 HRB	94.5 HRB

Fig. 2. Microstructures of steels.

Table 1. Chemical composition of tested steels.

Steel	[mass%]						
	C	Si	Mn	S	Cr	s-Al	O
0 %Al	0.40	0.19	0.81	0.001	0.10	<0.002	0.0016
0.01 %Al	0.40	0.19	0.81	0.001	0.10	0.008	0.0015
0.1 %Al	0.40	0.20	0.81	0.001	0.10	0.101	0.0012
Steel	C	Si	Mn	S	Cr	s-Al	O
0 %Si	0.40	<0.01	0.81	0.020	0.10	<0.002	0.0023
0.2 %Si	0.40	0.20	0.80	0.019	0.10	<0.002	0.0021
1.0 %Si	0.40	0.99	0.80	0.018	0.10	<0.002	0.0011

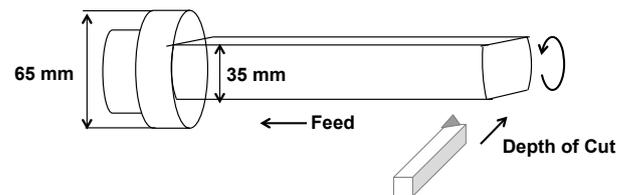


Fig. 1. Schematic diagram of intermittent turning testing specimen.

2. 2 供試材の内質

各鋼種の焼ならし後のミクロ組織の光学顕微鏡写真、介入物写真およびロックウェル硬さ測定結果をFig. 2に示す。いずれの水準もフェライトとパーライトの混合組織を呈しており、Al量によらず硬さ、組織サイズに大きな差は観察されなかった。一方、Si量を増加した場合は硬さが増加した。切削性に影響すると考えられるMnSの量、大きさ、形態については、Al量、Si量変化材ともに大きな変化は観察されなかった。

2. 3 旋削時の工具摩耗評価方法

工具摩耗の評価は、Fig. 1に示す直径65 mmの試験片を被削材とする旋削試験により実施した。Table 2に切削条件を示す。試験片は、丸棒形状からさらに35 mm幅の二面幅形状に加工した形状である。旋削試験は約65°の加工の後、空転をする動作を繰り返す断続的な加

工となる。本試験に用いた工具は、超硬母材に工具側から TiCN, Al₂O₃ コーティングが合わせて約 10 μm 施されている。すくい面にはさらに TiN が数 10 nm 程度コーティングされている。定期的に切削工具を取り外して光学顕微鏡による工具摩耗の観察を行い、横逃げ面摩耗幅 (Flank Wear) を調査した。工具摩耗の評価は、最も工具寿命を律速しやすい部位で実施するのが一般的であり、旋削の場合は横逃げ面と考え、判断指標とした。

Table 2. Cutting condition of turning test.

Cutting speed	120 m/min
Depth of cut	0.5 mm
Feed rate	0.35 mm/rev
Cutting fluid	Dry
Tool material	Cemented carbide
Tool coating	CVD: Al ₂ O ₃ , TiCN
Insert	TNMG160408 MC6025

2. 4 旋削時の摩擦特性評価方法

工具摩耗幅の差異を考察するため、擬二次元旋削試験を実施した。Fig. 3 に試験方法の模式図を示すが、試験は断続旋削 (Test 1) と連続旋削 (Test 2) で行った。断続旋削では Fig. 1 の試験片を、連続旋削では直径 65 mm の丸棒をそれぞれ用いて、外周部に溝入れ加工で 2 mm 幅のフランジを成形し、この部分をブランチカットすることで擬二次元旋削とした。Table 3 に切削条件を示す。すくい角を 0° とした工具で試験を行い、工具すくい面に垂直に作用する主分力 (Fc) とすくい面に平行に作用する背分力 (Ft) を測定した。すくい角を 0° としたのは、工具-切りくず間の摩擦力を背分力と一致させることで後の解析を容易にするためである。主分力と背分力は Kistler 社製多成分切削動力計 9129AA を用いて測定した。本研究の工具摩耗試験に用いた工具はコーティングに Al₂O₃ が含まれているため、切削時に工具表面に Al を含む付着物が生成したとしても、観察が容易ではない。そのため、本試験では、超硬にコーティングが施されていない工具を使用した。

2. 5 工具付着生成物の評価方法

工具付着生成物の同定は、観察の容易性から 2. 4 で述べたノンコーティング工具で旋削したすくい面で行った。なお、横逃げ面摩耗幅とすくい面摩耗幅 (Crater Wear) で鋼種間の傾向は変わらないことは確認している。成分同定は、加速電圧 15 kV で電子線マイクロア

ナライザー (Electron Probe Micro Analyzer : EPMA) を使用した。さらに、工具付着生成物を詳細に観察するため、Test 1 で旋削した工具を 3 次元アトムプローブ電界イオン顕微鏡 (Three-dimensional Atom Probe : 3DAP) で分析した。

3DAP 用試料の作製方法を Fig. 4 に示す。3DAP 分析は、エネルギー分散型 X 線分光装置 (Energy Dispersive X-ray spectrometry : EDS) で工具すくい面の成分分析を事前に行い、Al が明確に検出される場所から作製した針状試料で行った。針状試料は集束イオンビーム (Focused Ion-Beam : FIB) で工具付着生成物と工具界面を含む領域から作製した。EDS は oxford 社製 Aztec, FIB は FEI 社製 Helios450, 3DAP は アメテック社製 LEAP4000XSi を用いた。

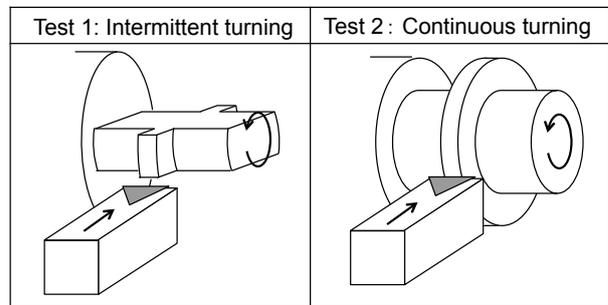


Fig. 3. Schematic diagrams of two-dimensional turning tests.

Table 3. Cutting condition of two-dimensional turning test.

Cutting speed	120 m/min
Cutting width	2.0 mm
Feed rate	0.30 mm/rev
Cutting fluid	Dry
Tool material	Cemented carbide, uncoated
Rake angle	0°
Insert	TPMN160304 UTi20T

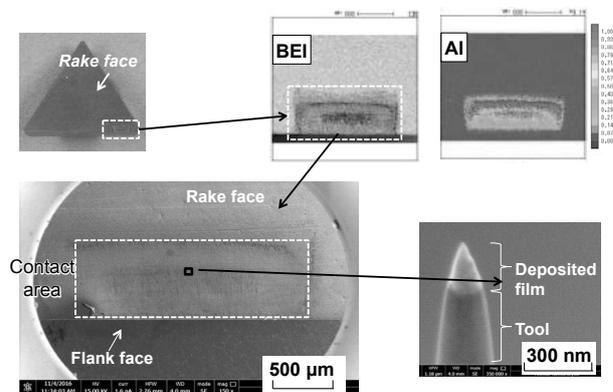


Fig 4. Procedures in preparation of a tip specimen for 3DAP.

3. 結果および考察

3. 1 断続旋削試験における工具摩耗評価結果

Fig. 5にAl量を変化させた供試材を52.4 min加工した工具の横逃げ面, コーナー部, すくい面の光学顕微鏡写真を示す. 0%Al鋼の旋削後工具に比べて0.1%Al鋼の旋削後工具においては, いずれの工具部位においても摩耗が低減している. Fig. 6に横逃げ面摩耗幅の経時変化を示す. 横逃げ面摩耗幅は, 切削時間とともに単調増加し, Al量の増加とともに摩耗量が減少している. さらに, 旋削初期の切りくず形態やテンパーカラー, 切削抵抗についても調査し, 今回の添加量範囲においてはAl量の有無で大きな差異はないことを確認している. なお, 今回の鋼種系においてもSi量の増加により断続旋削時の工具摩耗が低減することを確認している.

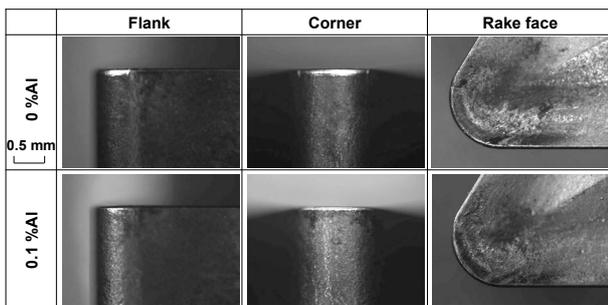


Fig. 5. Appearance of tool after turning test.

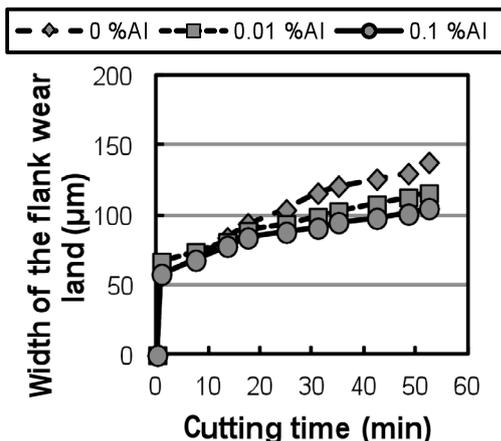


Fig. 6. Change of tool wear with cutting time.

3. 2 切削時の摩擦状態の確認

工具-切りくず間の摩擦力におよぼす工具付着生成物の影響を評価するため, F_c と F_t の関係を用いて工具表面の見かけの動摩擦係数 (μ_a) を評価した. 今回の試験条件では, Fig. 7に示すように F_c が工具に垂直に作用し, F_t が工具に水平に作用するため以下の式が成立

する. F_c と F_t の比を工具-切りくず間の μ_a として扱うことができる.

$$F_t = \mu_a \times F_c$$

μ_a : 見かけの動摩擦係数 [-]

Test 1に示す擬二次元旋削により求めた μ_a を被削材のAl量で整理した結果をFig. 8に示し, μ_a をSi量で整理した結果をFig. 9に示す. Si量の増加に伴い, μ_a が低下する傾向が認められる. 一方, Al量の増加に伴い, μ_a の低下は観察されない. なお, 本試験条件においては, 切削抵抗やせん断角に影響すると考えられる構成刃先の生成は認められなかった. さらに, Si量が増加した場合は切りくずカール半径が小さくなるが, Al量が増加しても切りくずカール半径は大きく変化しないことを確認しており, 上記の摩擦状態の違いを支持する結果であると考えられる.

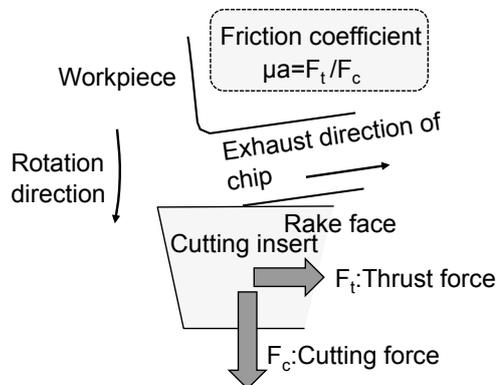


Fig. 7. Schematic diagram of cross-section of two-dimensional turning test.

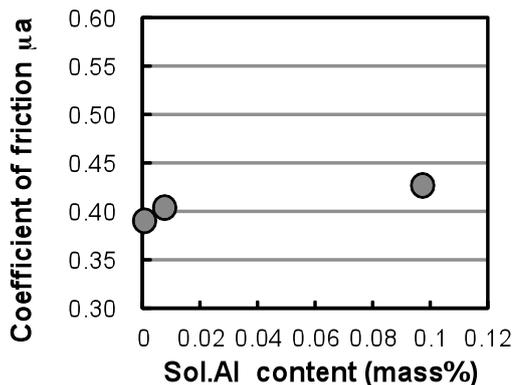


Fig. 8. Relationship between friction coefficient and Al content.

3. 3 工具付着生成物の確認

Test 1の擬二次元旋削を行った工具すくい面表面のEPMA元素マッピング結果をFig. 10(a)に示す. 0%Al鋼においては, Contact areaにFe, Si, Mn, Cr系の酸化膜が観察された. 一方, 工具摩耗が抑制された0.01%Al鋼,

0.1 %Al 鋼においては、上記に加えて Al 系酸化膜が観察された。また、Al 量の増加に伴い Al 強度が大きくなることを確認しており、酸化膜が厚くなっていることが示唆される。Al 系酸化膜が工具摩耗の低減に寄与したと推察される。Al による工具摩耗改善事例として、山根らは BN 快削鋼では工具表面に AlN が生成し、工具摩耗が抑制すると報告している¹⁰⁾。本件では、旋削後の工具表面に N は確認されず、改善機構は異なると考えられる。なお、コーティングが施されている工具を用いた寿命試験後においても Al 系酸化膜が生成していることを確認している。また、Si 量を変化させた水準において、0.2 %Si 鋼、1.0 %Si 鋼では Si 系酸化膜が観察され、Si 量の増加に伴い Si 強度が大きくなることも確認している。

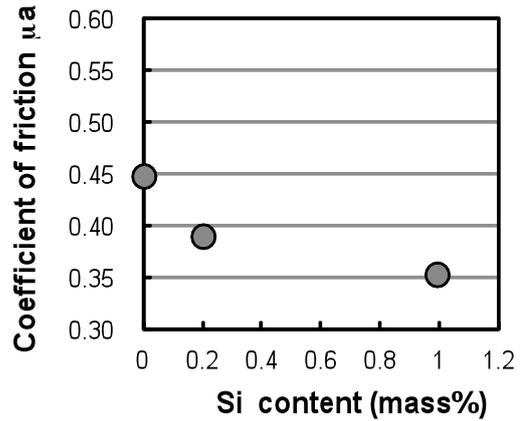
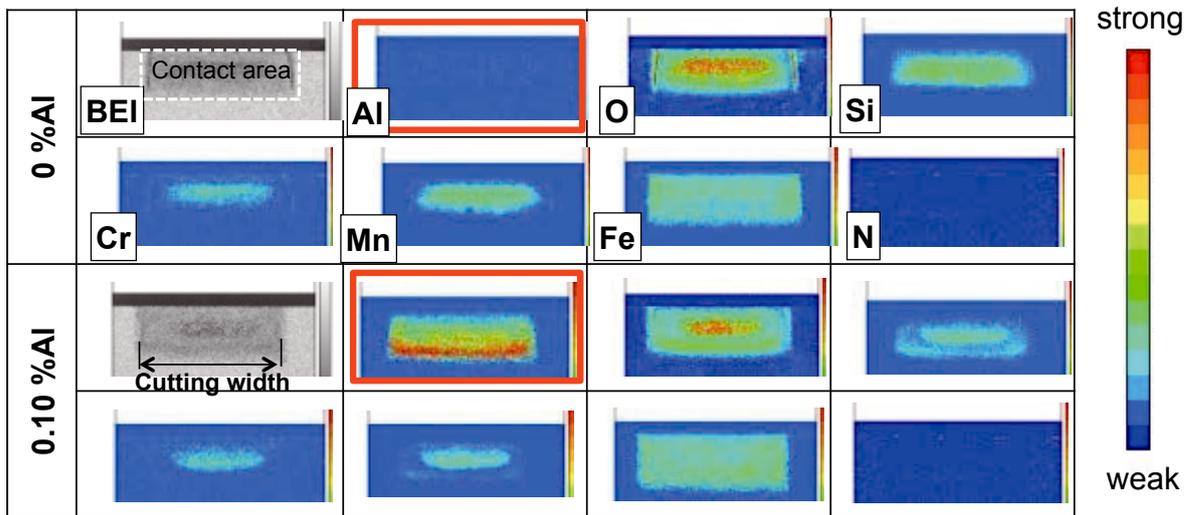


Fig. 9. Relationship between friction coefficient and Si content.

(a) Test 1



(b) Test 2

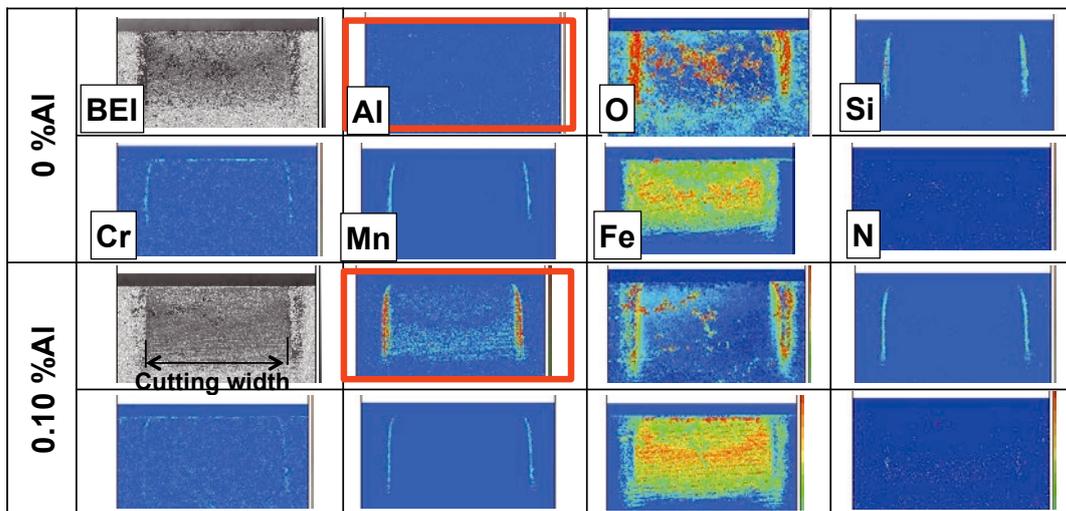


Fig. 10. EPMA mappings of rake face of the tools after two-dimensional turning test. (a: Test 1, b: Test 2)

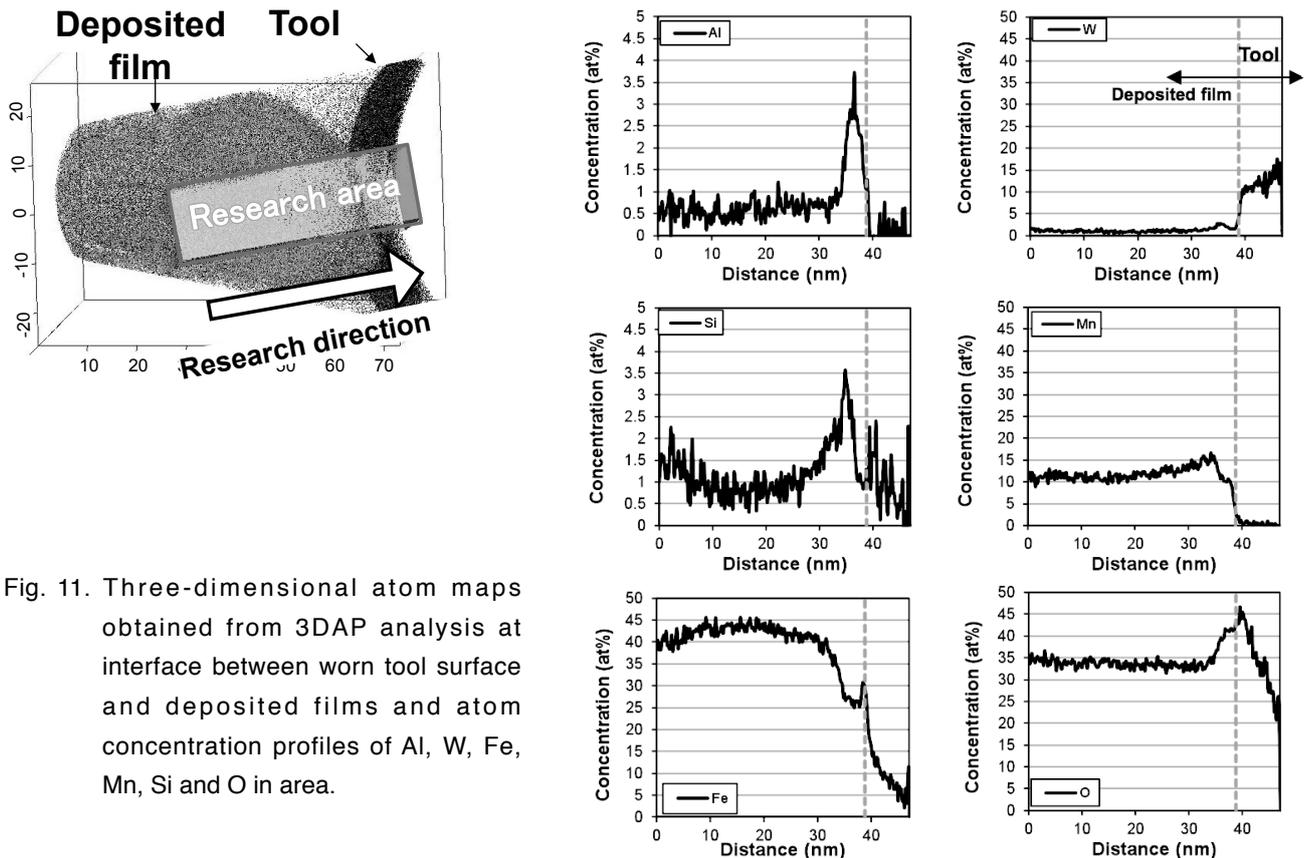


Fig. 11. Three-dimensional atom maps obtained from 3DAP analysis at interface between worn tool surface and deposited films and atom concentration profiles of Al, W, Fe, Mn, Si and O in area.

さらに、工具付着生成物を詳細に観察するために行った3DAP分析結果をFig. 11に示す。3次元アトムプローブ像のResearch areaで示した領域におけるFe, O, Al, Mn, W, Siの原子マップを再構築し、濃度プロファイルを作成した結果も示す。濃度プロファイル図内に破線で示した位置が付着物と工具摩耗面の界面と考えられる。Alは付着物と工具の界面に濃化して存在し、界面から離れた位置にはFe, Mnが多く存在している。

3. 4 切削性に対するAl系酸化膜の効果

従来から研究・開発されてきた快削鋼の快削性メカニズムについては、(1) MnSやPbによるぜい性付与効果による切りくず生成の容易化、(2) PbやBiによる工具接触面での潤滑効果、(3) Ca脱酸調整鋼などにおける酸化物系介在物の工具摩耗面への付着による工具-被削材間の保護効果が挙げられる。

上記を参考に、Al系酸化膜による切削性改善効果を検証する。Fig. 2で示したように、本件の試料にMnS介在物はほとんど含有しておらず、(1)の効果を有していないと考えられる。Fig. 8で述べたようにAl量を変化させた場合、添加量が増加しても摩擦係数が大きく変化しないことを確認しており、(2)の潤滑効果を有していないと考えられる。一方、Fig. 9で述べたようにSi量

を変化させた場合は、Si量の増加に伴い、摩擦係数が低減する。岡田らはFeOと各種金属酸化物の共晶融点を比較し、 Al_2O_3 に比べて SiO_2 は共晶融点が低いと報告している¹¹⁾。本結果はこの差が影響している可能性が考えられる。すなわち、Si添加により断続旋削時の工具摩耗が抑制された要因は(2)の潤滑効果と推察される。一方、Al添加により断続旋削時の工具摩耗が抑制された要因は、(3)工具付着生成物による保護効果と推察される。単体の酸化物硬さを比較した場合、 Mn_2O_3 、 Cr_2O_3 、 SiO_2 などの酸化物に比べて Al_2O_3 は硬いため¹²⁾、複合酸化膜となった場合も、Alが含まれる酸化膜はAlが含まれない酸化膜に比べて、膜硬さが相対的に硬いことが想定される。そのため、Alが含まれる酸化膜は、機械的摩耗の低減や工具母材の露出を遅延させることにより凝着摩耗や拡散摩耗を抑制していると考えられる。いずれにせよ、酸化膜にAlが濃化し、硬質化することが工具摩耗低減に寄与していると考えられる。なお、山本らはコーティング膜の組成を $(Ti_{1-x}Al_x)N$ 膜で変化させた工具で切削試験と酸化増量試験を行い、耐摩耗性が優れた水準では表層にAl酸化膜が形成していることとAl割合の増加により耐酸化性が向上することを報告している。本件においても、酸化膜種による耐酸化性の違いが影響している可能性も考えられる¹³⁾。

3. 5 Al系酸化膜の生成メカニズム

工具付着生成物である Al 系酸化膜の生成・付着機構については、鋼材中に存在する Al_2O_3 が切削中に工具摩耗面に付着するという考え方と、鋼材中に存在するものが付着するのではなく、切削中に摩耗面で生成され付着するという、2つの場合が考えられる。0.01 %Al 鋼の焼きならし材を臭素メタノール溶液で溶解し $0.2 \mu m$ フィルターでろ過した残渣を抽出分析したが、AIN は存在しておらず、 Al_2O_3 以外の Al はマトリクス中に固溶している状態であると推定される。Fig. 10(a) に示すように、Al 系酸化膜は断続旋削時の切りくず接触部で広く観察される一方、Fig. 10(b) に示すように連続旋削時は境界部のみで観察される、すなわち、Al 系酸化膜は酸素が供給される環境でのみ生成している。この結果から、Al 酸化膜の生成・付着は鋼材中の Al_2O_3 が付着したのではなく、旋削加工中の高温・高圧環境化で工具側に拡散した固溶 Al が大気中の酸素と反応し、Al 系酸化膜を生成し、堆積を繰り返した結果と考えられる。Fig. 11 に示すように工具最表面に Al が生成した理由としては、Al は一般的に Mn, Cr, Si などと比べて酸化物形成の自由エネルギーが小さいため⁹⁾、刃先離脱直後の高温かつ低酸素雰囲気において優先的に酸化したためと考えられる。

(文 献)

- 1) 伊藤哲朗, 高橋徹夫, 阿部山尚三, 木村篤良: 電気製鋼, 44(1973), 38.
- 2) 伊藤哲朗: 鉄と鋼, 47(1961) 10, 333.
- 3) 阿部山尚三, 中村貞行: 特殊鋼, 29(1980) 5, 47.
- 4) 香月学, 田中義和, 山口旻, 高瀬信男: 鉄と鋼, 60(1974) 4, S187.
- 5) 山本俊郎, 熊谷憲一: 鉄と鋼, 60(1974) 8, 1114.
- 6) 藤井利光, 松田幸紀: 電気製鋼, 74(2003), 83.
- 7) 海野正英, 瀬羅知暁, 岡田康孝, 村上大介, 村上禮三, 椿野晴繁: 鉄と鋼, 89(2003), 105.
- 8) 第 5 版鉄鋼便覧第 3 巻, 日本鉄鋼協会, 2014, 486.
- 9) 金田次雄, 古沢貞良, 竹下秀男, 山本義則: 日本鉄鋼協会講演概要, 94(1977), 484.
- 10) 白神哲夫, 山根八州男: CAMP-ISIJ, 13(2000), 532.
- 11) 岡田康孝: 熱処理, 41(2001), 183.
- 12) サムソノフ: 酸化物便覧, 日・ソ通信社, 1970, 254.
- 13) 山本兼司, 久次米進: 神戸製鋼技報, 59(2009), 18.



大橋亮介



山崎歩見



井上圭介

4. 結 言

JIS-S40C ベースの断続旋削における工具摩耗に対する Al 量の影響評価と、工具表面に生成する酸化膜の調査から、以下の結論を得た。

- (1) 0.1 %までの範囲において、Al 量の増加に伴い工具摩耗は抑制される。
- (2) Al を添加することで、旋削後の工具表面に Al 系酸化膜の生成が認められる。また、Al 量の増加に伴い酸化膜が厚くなる。
- (3) 擬二次元断続旋削において、Al 量が増加しても摩擦係数も切りくずカール半径も大きく変化しない。一方、Si 量が増加した場合は、摩擦係数と切りくずカール半径が小さくなる。
- (4) Al による工具摩耗抑制メカニズムは、旋削時に生成する酸化膜に Al が濃化し酸化膜の耐摩耗性が向上することで工具母材の露出が遅延し、被削材の凝着が抑制されたことや Al 系酸化膜により被削材-工具間での拡散が抑制されたことが一因と考えられる。