

HRC40 プリハードン鋼切削時の工具損傷機構

Damaging Phenomena of Cutting Tools Using Plastic Mold Steels of HRC40

森下 佳奈*
Kana Morishita

井上 謙一*
Kenichi Inoue

本研究では、異なる特徴を持つ2種類のプラスチック金型鋼切削時における工具損傷機構について考察した。日本国内で主に用いられているP21系改良鋼(鋼材A)と特性バランスが良い鋼材(鋼材B)を評価に使用した。特に、切削時に工具と被削材間で生じる溶着現象に着目し、FE-EPMA、TEMを用いて調査した。

鋼材A切削時はチッピングを伴う摩耗、鋼材B切削時は純粋な摩耗により工具が寿命に至り、損傷形態が大きく異なった。また、鋼材B切削時は切削速度の上昇に伴い、工具摩耗の進行が遅くなる傾向であった。溶着物を調査した結果、鋼材A切削時はAl系酸化物、鋼材B切削時はMn-Si系酸化物が工具刃先に形成され、Mn-Si系酸化物は切削速度の上昇に伴い、工具刃先に形成される量が増加した。工具寿命の結果から判断すると、Mn-Si系酸化物が保護膜として作用し、工具の損傷を抑制したと推測され、溶着物と工具寿命には強い関係があることが示唆された。

In this paper, damage modes of cutting tools and their mechanisms are investigated aiming to improve machinability of plastic mold steels. Steel A is commonly used in Japan, which is known as P21 grade steel. While, steel B is a new HRC40 grade steel. For this purpose, the tool edge-steel work piece interface was investigated using FE-EPMA, TEM, and STEM. Particularly, the adhesive materials formed on the tool edges were analyzed and tools damage was studied.

To understanding the difference between the two modes of tool edge damage, adhesive materials on the tool edges were investigated. As the result, when steel A was cut, an Al-based oxide was formed on the tool edge, whereas an Mn-Si-based oxide layer was formed on the tool edge when steel B was cut. In addition, the Mn-Si-based oxide content increased with higher cutting speed. It can be speculated that there is a strong correlation between the formation of some adhesive materials and damage mode of cutting tool.

● Key Word : プラスチック金型鋼, 直彫り加工, 溶着物

● R&D Stage : Research

1. 緒言

金型の製作費低減や短納期化により、焼きなまし材での荒加工を省略し、焼入れ焼き戻し材を直接加工する「直彫り加工」が拡大しており、ロックウェル硬さがHRCで40程度まではすでにさまざまなプリハードン鋼が用いられている。しかし、HRCで50以上は、加工自体は可能¹⁾であるが、工具費がかさむなどの理由から量産レベルの技術として定着していない。そこで、本研究では、難削性を示す高硬度金型鋼の被削性改善を目的とし、切削加工時の工具損傷メカニズムの解明を行った。工具摩耗を抑制させる方法として、材料中に存在する非金属介在物を保護膜(Belag)として工具表面に形成することが有効であると知られている²⁾。このことから、特に、切削時に工具と被削材間で生じる溶着現象を調査することにより、工具損傷の主要因が特

定可能であると考えられる。本研究では、まず高硬度材の中でも比較的加工が容易とされるプラスチック金型用のHRC40プリハードン鋼で評価を実施した。

2. 実験方法

表1に、本研究に使用した被削材の主要化学成分を示す。鋼材Aは日本国内で主に用いられているP21系改良鋼(NiAl析出硬化低炭素鋼)である。鋼材Bは磨き性および

表1 被削材の主要化学成分

Table 1 Chemical compositions of work materials

	C	Si	Mn	S	Ni	Al
Steel A	0.12	0.3	1.4	0.004	3.0	1.0
Steel B	0.16	0.3	1.5	0.015	1.0	—

(mass%)

* 日立ツール株式会社

* Hitachi Tool Engineering, Ltd.

被削性および靱性などの特性バランスが良いとされる鋼材である。これらの特性が異なるプラスチック金型鋼³⁾をHRC40に調質したものを使用した。

表2に、切削条件を示す。加工機は、主軸テーパ 50番の立形マシニングセンター（日立精工製 MACCMATIC-610V）を用い、直径63 mmのスローアウェイ式フライスカッターにより正面切削を行い、工具寿命を評価した。使用刃数は1枚とした。試験片は120 mm角× 250 mm長さの試験片を用いた。溶着現象は、切削時の工具表面温度により変化すると考えられるため、切削速度を変えることで切削面の温度を変化させて評価を実施した。使用したカッターでの推奨切削速度は90 m/min程度である。一定距離ごとに工具の摩耗幅を測定し、最大逃げ面摩耗幅が250 μmに達したときの切削距離を工具寿命とした。使用工具は超硬インサート工具とした。その皮膜は被削材成分を含まないTiN組成とし、溶着物と皮膜成分が混同しないように留意した。TiNコーティングはPVD-AIP法(Physical Vapor Deposition-Arc Ion Plating Method)により成膜した。溶着物の評価は、FE-EPMA (Field Emission-Electron Probe Micro Analyzer)により表面から、TEM(Transmission Electron Microscope)により断面から実施した。

表2 切削条件

Table 2 Cutting conditions

Cutter	Diameter	63 mm
	Number of teeth	1/6
Insert	Carbide	P40
	Coating	TiN
Cutting conditions	Axial depth of cut	1 mm
	Radial depth of cut	42 mm
	Cutting speed	60~150 m/min
	Feed per tooth	0.8 mm/tooth
	Revolution	303~758 min ⁻¹
	Feed rate	242~606 mm/min
	Cutting method	Down cut
	Cutting fluid	Dry
Criterion for tool life (flank wear = 250 μm)		

3. 実験結果および考察

3.1 切削試験

図1に、加工時の切削距離と工具の最大逃げ面摩耗幅の関係を示す。すべての切削速度において鋼材B切削時の工具寿命は、鋼材A切削時より長く、鋼材Bは切削速度の上昇により、工具摩耗の進行が遅くなる傾向にあった。工具寿命は切削速度の上昇に従い短くなる⁴⁾とされており、鋼材B切削時の現象は特殊であるといえる。

図2に、各切削速度における工具寿命到達時の損傷状況を示す。鋼材A切削時の工具はチッピングを伴う摩耗、鋼材Bは純粋な摩耗により寿命に至り、工具の損傷形態が大きく異なった。同一鋼材では切削速度が変化しても工具損傷形態は類似していた。

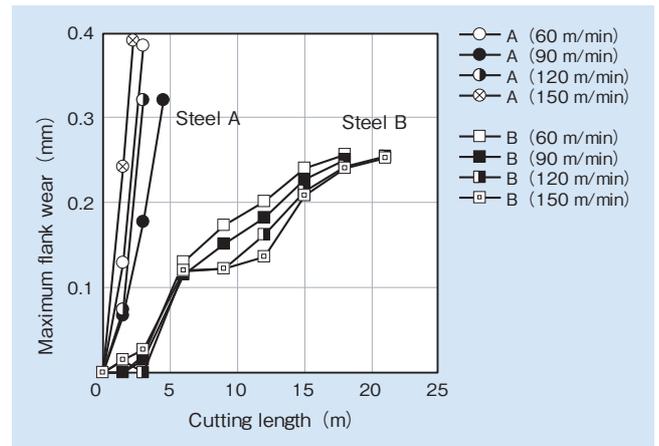
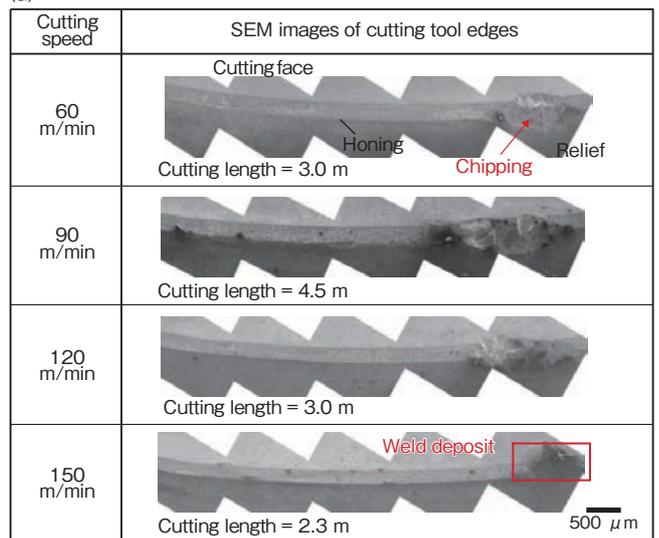


図1 切削距離と工具の逃げ面最大摩耗幅の関係
Fig. 1 Relationship between cutting length and flank wear

(a)



(b)

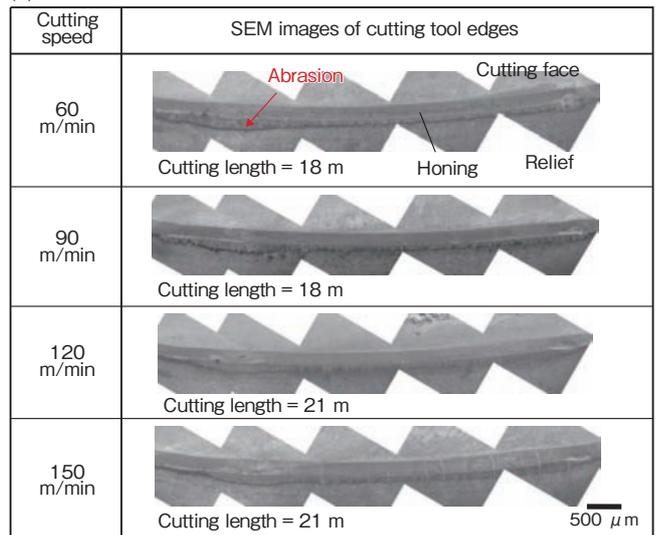


図2 工具寿命到達時の工具のSEM像 (a) 鋼材Aを切削した場合 (b) 鋼材Bを切削した場合

Fig. 2 SEM images of coated tool (a) Steel A (b) Steel B

図3に、工具が寿命に到達する以前、切削速度90 m/minで1.5 m切削時の工具損傷状態を示す。工具寿命が短い鋼材A切削時は鋼材Bよりも逃げ面 (Relief) 側での純粋な工具摩耗の進行は遅い。一方、刃先強度アップのために逃げ

面 (Relief) とすくい面 (Cutting face) の間に形成されるホーニング (Honing) 部では、鋼材Aは鋼材B切削時よりも皮膜剥離が多く発生している。また、鋼材A切削時には、

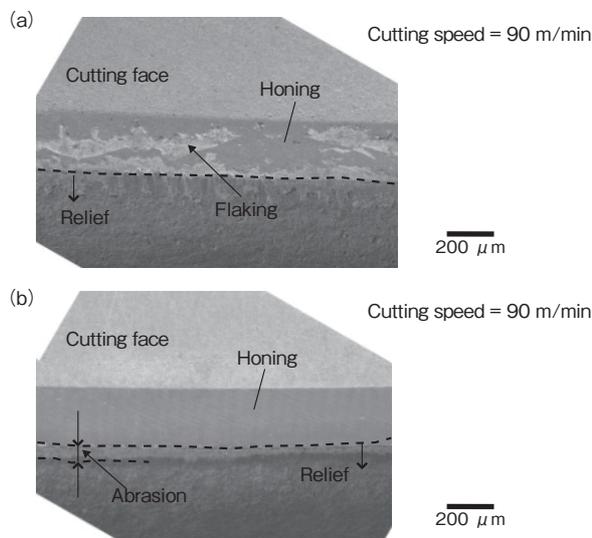


図3 1.5 m 切削時の工具のSEM像
(a) 鋼材Aを切削した場合 (b) 鋼材Bを切削した場合
Fig. 3 SEM images of coated tool (cutting length = 1.5 m)
(a) Steel A (b) Steel B

図2の切削速度150 m/min切削時、□囲みで示すような鋼材の付着が生じていた。このことから、鋼材A切削時は、工具皮膜の剥離発生後、鋼材の付着が起り、切削中に付着物が剥がれる際に、突発的な欠損を生じやすく、短寿命であったと考えられる。

3.2 溶着物解析

鋼材AとBでは切削時の工具損傷形態が大きく異なること、鋼材B切削時は切削速度の上昇に伴い工具摩耗の進行が遅くなる傾向であることが判明した。図2、3の切削時における工具刃先のSEM (Scanning Electron Microscope) 観察結果から、切削時に工具と被削材間で生じる現象が異なると推測される。そこで、鋼材成分から付与される溶着物の種類と工具損傷形態の関係性についてさらに考察を行った。

3.2.1 EPMAによる溶着物の表面解析

図4に、切削速度90 m/minで0.75 m切削時の工具において、すくい面側全体と図中□範囲のホーニングを拡大した箇所を分析結果を示す。工具摩耗は逃げ面側に進行し

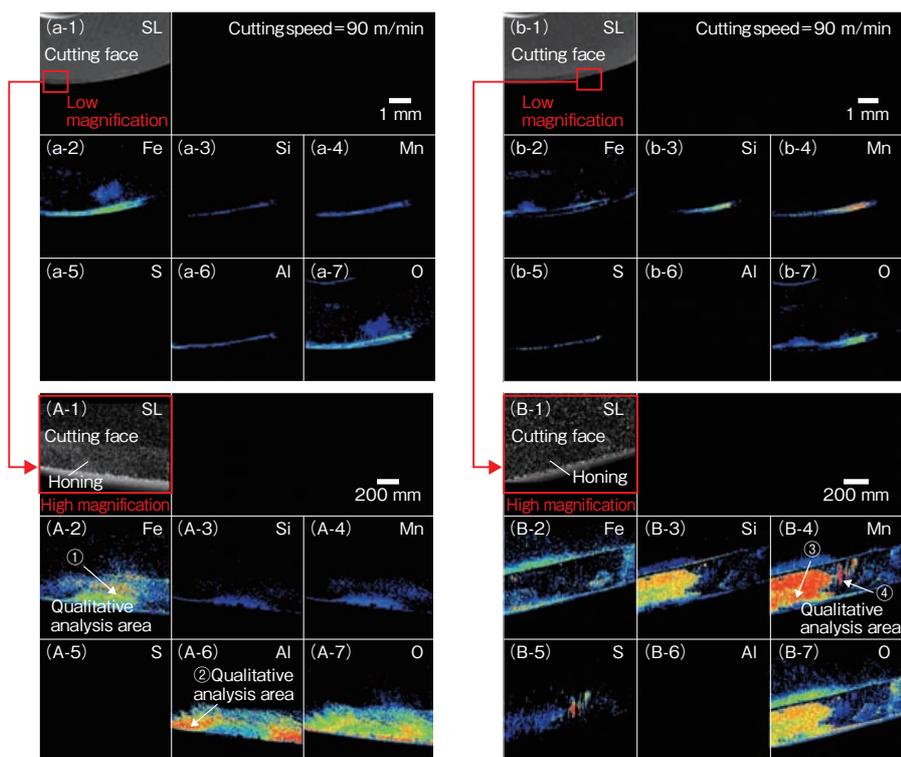


図4 0.75 m 切削時の工具面分析結果
(a-1) ~ (a-7) 鋼材Aを切削した場合、低倍率観察 (A-1) ~ (A-7) 鋼材Aを切削した場合、高倍率観察
(b-1) ~ (b-7) 鋼材Bを切削した場合、低倍率観察 (B-1) ~ (B-7) 鋼材Bを切削した場合、高倍率観察
(a-1, A-1, b-1, B-1) SEM像, (a-2, A-2, b-2, B-2) Fe, (a-3, A-3, b-3, B-3) Si, (a-4, A-4, b-4, B-4) Mn, (a-5, A-5, b-5, B-5) S
(a-6, A-6, b-6, B-6) Al, (a-7, A-7, b-7, B-7) O

Fig. 4 WDS maps of coated tool (cutting length = 0.75 m)
(a-1) ~ (a-7) Steel A, low magnification (A-1) ~ (A-7) Steel A, high magnification
(b-1) ~ (b-7) Steel B, low magnification (B-1) ~ (B-7) Steel B, high magnification
(a-1, A-1, b-1, B-1) SEM images, (a-2, A-2, b-2, B-2) Fe, (a-3, A-3, b-3, B-3) Si, (a-4, A-4, b-4, B-4) Mn, (a-5, A-5, b-5, B-5) S
(a-6, A-6, b-6, B-6) Al, (a-7, A-7, b-7, B-7) O

ていくが、すくい面側の溶着物が観察しやすいこと、ホーニング部に皮膜剥離が観察され、鋼材により工具皮膜の損傷状態が異なったことから、特にホーニング部の溶着物に着目した結果を示す。表示元素は、溶着物主成分であった、Fe, Si, Mn, Al, O, Sである。SLは二次電子像を示す。両鋼種ともホーニング部に酸化物が形成されていた。一部、鋼材B切削時に硫化物が形成されていた。また、工具寿命を悪化させると考えられるFeの付着⁵⁾は、鋼材Aを切削した刃先に多く存在した。

表3に、図4中矢印で示す箇所における定性分析結果の主要成分を示す。測定範囲は1 μm程度であり、Tiは皮膜成分を検出した結果である。鋼材中のAl量が多い鋼材A切削時はAl系酸化物、鋼材B切削時はMn-Si系酸化物が確認され、鋼材成分中のSi, Mn, Alが濃化し、酸化物として形成していると考えられる。鋼材B切削時にはMnSも一部確認され、鋼材中に含有されるMnSが工具に付着したと考えられる。

表3 溶着物表面の定性分析結果
Table 3 Results of qualitative analysis

		Fe	Si	Mn	Al	S	O	Ti
Steel A	①	46.9	0.9	7.6	5.5	0.02	20.6	6.3
	②	1.8	0.3	0.6	57.8	0.00	15.1	0.7
Steel B	③	4.6	12.0	47.9	0.0	1.59	28.4	1.7
	④	3.7	0.2	50.5	0.0	11.2	7.9	2.2

(mass%)

図5に、溶着物の分布模式図を示す。図は、各切削速度で図4と同様の評価を実施した結果より作成した。鋼材A切削時は切削速度の上昇に伴い付着するAlが減少し、Feが増加する。一方、鋼材Bは切削速度の上昇に伴い、Mn-Si系酸化物が増加し、MnSが減少する。工具寿命の結果から判断すると、Mn-Si系酸化物が付着することは保護膜としての作用があり、工具の損傷を抑制すると考える。また、高速度側において特にFeが付着する鋼材Aは、本研究の加工方法では、保護膜としての作用が低く、皮膜剥離や、チップングなどの損傷に至ると推測される。これまでの実験結果より、それぞれの鋼材において最適な切削条件は存在するが、溶着物と工具寿命には強い関係性があることが示唆された。

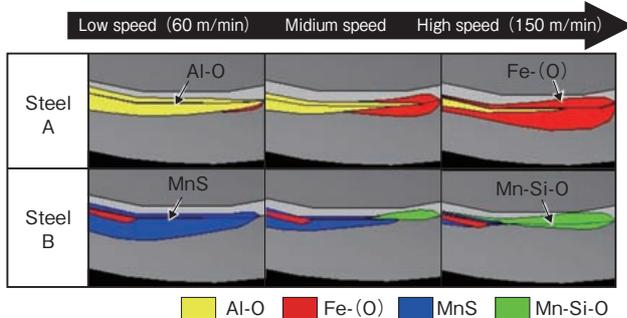


図5 各鋼材切削時における溶着物の分布模式図
Fig. 5 View showing frame format of adhesive materials

3. 2. 2 TEMによる溶着物の断面解析

溶着物についてさらに詳しく調べるため、図4中②、③矢印付近について、溶着物断面構造、厚さ、結晶構造、組成の調査を実施した。

図6に、溶着物の暗視野STEM (Scanning Transmission Electron Microscope) 像を示す。鋼材A切削時の溶着物厚さは、1.2 μm程度であり、灰色の領域と白色の領域が交互に積層する構造であった。一方、鋼材Bは0.8 μm程度であり、灰色の領域内に粒状の白色の領域を含む単層構造の溶着物であることを確認した。

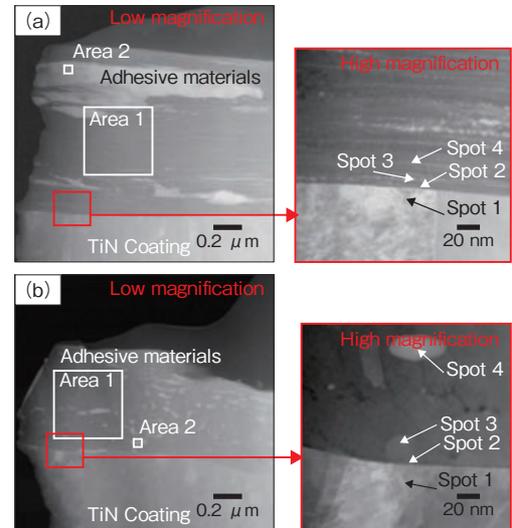


図6 溶着物の暗視野STEM像
(a) 鋼材Aを切削した場合 (b) 鋼材Bを切削した場合
Fig. 6 STEM images of coated tool (a) Steel A (b) Steel B

表4に、図6に示す各箇所の定性分析結果を示す。Area部は図中に示す範囲、Spot部はすべて5 nm角範囲を分析した。Oは検出されたが信頼性が低いため金属成分のみを示す。白い領域は、鋼材A, BともにFeが主成分であり、

表4 溶着物断面の定性分析結果
Table 4 Results of qualitative analysis

		Fe	Si	Mn	S	Al	Ti
Steel A	Area 1	3.6	1.2	2.8	0.10	91.1	0.1
	Area 2	91.1	0.3	3.4	0.00	0.7	0.1
	Spot 1	0.1	0.3	0.0	0.52	0.3	98.1
	Spot 2	8.8	3.0	7.8	0.88	70.6	6.4
	Spot 3	47.1	3.1	9.9	0.00	34.7	1.2
	Spot 4	4.3	1.6	3.3	0.66	85.9	2.2
Steel B	Area 1	0.6	23.1	72.5	2.07	0.3	0.0
	Area 2	93.6	0.4	1.9	0.12	0.2	0.0
	Spot 1	0.1	0.3	0.0	0.07	0.2	99.2
	Spot 2	0.0	26.5	56.1	1.12	0.5	7.7
	Spot 3	0.1	24.7	69.7	1.84	0.6	0.7
	Spot 4	80.7	6.0	9.9	0.22	0.5	0.1

(mass%)

灰色の領域は、鋼材AはAl系酸化物、鋼材BはMn-Si系酸化物であった。

Al_2O_3 の融点は2,050℃程度、 $MnO \cdot SiO_2$ は1,200℃程度である。つまり、鋼材Aで形成されたAl系酸化物は融点が比較的高いため、工具刃先に形成される場合、保護膜の機能は高く、工具の損傷抑制効果が期待できるが、Al系酸化物上にはFeが付着しやすく、溶着物が厚く堆積する傾向にあるため、チッピングなどの損傷に至ると推測される。一方、鋼材Bで形成されたMn-Si系酸化物は融点が低いため、潤滑性に優れ、保護膜として機能を十分に発揮する最適温度領域が存在し、切削条件の選定が重要であると推測される。

図7に、図6に示す箇所の制限視野回折像を示す。測定範囲は図6中に示す。鋼材A切削後の溶着物は、Al-Oとしての指数付けはできなかったが、AlN (hexagonalとfccの混在)型と仮定しての指数付けが可能であった。鋼材Bは、 Mn_2SiO_4 (Orthorhombic)で指数付け可能であった。さらに、溶着物と皮膜の界面付近では、鋼材AはAlN (fcc)、鋼材Bは Mn_2SiO_4 (Orthorhombic)、皮膜はTiN (fcc)であり、鋼材Aの溶着物とTiNは結晶構造が一致していた。よって、溶着物と皮膜間の密着性が皮膜と工具母材よりも良いため、鋼材A切削時、工具の皮膜剥離や欠損が生じやすいとも推察される。

4. 結 言

異なる特徴を持つ2種類のプラスチック金型鋼 (HRC40 プリハードン鋼) 切削時の工具損傷形態と溶着物の関係を調査した結果、同一硬さの鋼材でも、成分が異なると切削時における工具損傷形態、溶着物、最適切削条件が異なる結果を得た。以下、スローアウェイ式フライスカッターの正面切削結果により、鋼材成分から付与される溶着物の種類と工具寿命には強い関係性があることが示唆された。

- (1) 鋼材 A 切削時はチッピングを伴う摩耗、鋼材 B 切削時は純粋な摩耗により工具が寿命に至り、損傷形態が異なった。
- (2) 鋼材 A 切削時は Al 系酸化物、鋼材 B 切削時は Mn-Si 系酸化物の溶着物が工具刃先に形成された。
- (3) 切削速度の上昇に伴い、鋼材 A 切削時に形成される溶着物は、Al が減少し、Fe が増加した。
- (4) 切削速度の上昇に伴い、鋼材 B 切削時に形成される溶着物は、Mn, Si が増加し、工具摩耗の進行が遅くなった。

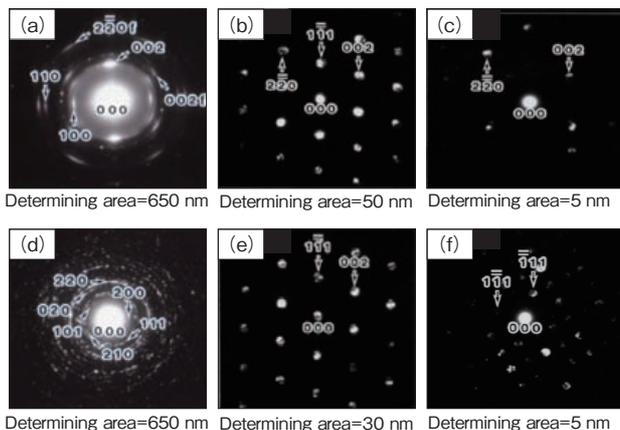


図7 電子回折パターン

- (a) 鋼材 A を切削した場合、エリア 1
- (b) 鋼材 A を切削した場合、スポット 1
- (c) 鋼材 A を切削した場合、スポット 2
- (d) 鋼材 B を切削した場合、エリア 1
- (e) 鋼材 B を切削した場合、スポット 1
- (f) 鋼材 B を切削した場合、スポット 2

Fig. 7 Diffraction patterns

- (a) Steel A, Area 1
- (b) Steel A, Spot 1
- (c) Steel A, Spot 2
- (d) Steel B, Area 1
- (e) Steel B, Spot 1
- (f) Steel B, Spot 2

引用文献

- 1) 藤井利光, 松田幸紀: 熱間工具鋼の被削性におよぼす Si 量の影響, 電気製鋼, 第 71 巻, 第 2 号, p.119-129 (2000)
- 2) 古屋諭, 尾添伸明, 臼杵年, 山根八洲男: 非介在物を利用した片状黒鉛鑄鋼高速切削時の快削化, 精密工学会誌, Vol.71, No.6, p.750-755 (2005)
- 3) 福島有一: プラスチック金型の最新動向, プラスチックス, Vol.59, No.12, p.18-22 (2008)
- 4) 小野浩二, 河村末久, 北野昌則, 島宗勉: 切削工具の摩耗と寿命, 理論切削工学, 現代工学社, 2003, p.109
- 5) 小野浩二, 河村末久, 北野昌則, 島宗勉: 切削工具の摩耗と寿命, 理論切削工学, 現代工学社, 2003, p.102



森下 佳奈

*Kana Morishita*日立ツール株式会社
基盤技術研究センター

井上 謙一

*Kenichi Inoue*日立ツール株式会社
基盤技術研究センター