

低炭素硫黄快削鋼の切削後表面粗さに及ぼす各種因子の影響

Factors Affecting Surface Roughness of Resulfurized Free Cutting Low Carbon Steel

今浪 祐太 IMANAMI Yuta JFE スチール スチール研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員(係長)
富田 邦和 TOMITA Kunikazu JFE スチール スチール研究所 棒鋼・線材研究部 主任研究員(部長)・博士(工学)
西村 公宏 NISHIMURA Kimihiro JFE スチール スチール研究所 棒鋼・線材研究部長

要旨

低炭素硫黄快削鋼の切削後表面粗さに及ぼす各種因子の影響はこれまで多数報告されている。しかし、それらのほとんどがハイス工具を使用した研究であり、近年主流となりつつある超硬等の工具における研究例は少ない。今回、切削後の表面粗さに及ぼす工具材種の影響ならびに材料因子の影響を検討した。その結果、工具材種毎の熱伝導率の相違を受け、切削温度が変化し、構成刃先の生成状態への影響を通じて、工具材種が表面粗さに影響する可能性がある。また、材料因子の観点から表面粗さを低減するには、超硬およびセラミックス工具のいずれを用いた場合でも、硫化物サイズの増大、硫化物アスペクト比の減少(紡錘状化)、降伏比の増大(フェライト微細化)が有効と示された。

Abstract:

Factors affecting surface roughness after cutting low carbon resulfurized free cutting steel have been reported in many papers in the past. However, most of studies were carried out using high speed steel tools instead of cemented carbide or ceramics tools which are becoming more popular recently. In this study, effect of tool materials and steel factors such as sulfides and yield ratio on surface roughness after cutting was studied. As a result, difference of thermal conductivity among tool materials changes cutting temperature. Change in cutting temperature affects surface roughness through formation behavior of built-up edge. On the other hand, from the viewpoint of steel factors, enlarging sulfides, decreasing aspect ratio of sulfides and increasing yield ratio are effective in order to reduce surface roughness with both cemented carbide tools and ceramic tools.

1. はじめに

低炭素硫黄快削鋼(非鉛)および低炭素硫黄複合快削鋼(鉛含有)はOA機器等の精密部品に使用されることが多く、製品仕様上、切削後の表面粗さが良好なことが要求される。近年、地球環境問題から快削鋼の非鉛化が強く求められ、低炭素硫黄快削鋼(非鉛)の被削性向上が重要となってきた。表1に切削後の表面粗さに影響し得る各種因子を整理した。低炭素硫黄快削鋼の表面粗さと各種因子の関係はこれまで多

数報告されているが、ハイス工具を使用した研究¹⁾が主であった。しかし現在では、ハイス以外に超硬等の工具も主流となりつつある。そこで、切削後の表面粗さに及ぼす工具材種の影響を検討した。更に、ハイス以外の工具で切削後の表面粗さに及ぼす材料因子の影響についても調査した。

2. 表面粗さに及ぼす工具材種の影響

2.1 実験方法

表2に供試鋼の化学組成を示す。低炭素硫黄快削鋼としてJIS規格のSUM23を実機溶製し、直径110mmの丸棒に熱間圧延した。得られた丸棒の表層から深さ2mmの位置についてピッカース硬度(Vickers hardness, HV)を測定し、鏡面研磨後に介在物を、3%ナイタール液で腐食後にマイクロ組織を光学顕微鏡観察した。表面粗さは表3に示す条件で外周旋削を行った後、触針式粗さ計にて十点平均粗さ(Rz²⁾)を測定した。工具材種として超硬K10、超硬P20、サーメット(TiN)、セラミックス(Al₂O₃)を選択し、試験水準毎に新品の工具を使用することで、工具の摩耗が表面粗さに及ぼ

表1 切削後の表面粗さに影響する各種因子
Table 1 Factors on surface roughness after cutting

No.	Factors	No.	Factors
1	Cutting speed	5	Tool material
2	Feed rate	6	Lubricant
3	Insert nose radius	7	Rigidity of cutting machine
4	Rake angle	8	Worked material

2016年7月29日受付

表 2 供試鋼の化学組成

Table 2 Chemical compositions of steels (Mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al
SUM23	0.08	-	1.2	0.07	0.33	-
S10C	0.08	0.2	0.4	0.02	0.01	0.024

表 3 旋削試験条件

Table 3 Turning test conditions

Tool shape	TNGN160404	Tool material
Cutting speed	70-200 m/min	
Feed rate	0.05 mm/rev	
Depth of cut	2 mm	
Lubricant	Dry	
		Cemented carbide: K10
		Cemented carbide: P20
		Cermet (TiN)
		Ceramics (Al ₂ O ₃)

す影響を排除した。切削後の工具は実体顕微鏡で外観を観察後、すくい面の走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 観察および EDX (Energy Dispersive X-ray) 分析に供した。比較鋼として、SUM23 よりも工具寿命には劣るが、圧延後硬度が同程度の S10C も同様の試験に供した。

2.2 実験結果

写真 1 に圧延材の組織観察結果を示す。SUM23, S10C ともにフェライト中にパーライトが分散した組織を呈したが、SUM23 では圧延方向に平行なパーライトバンドが認められた。これは S10C と比較して SUM23 は Mn, P, S 量が多くマイクロ偏析の影響が強いためと考えられる。介在物については、SUM23 では多数の硫化物が粗大かつ紡錘状に分散しているのに対し、S10C では粗大な硫化物はほぼ認められない。また、両鋼の硬度は約 110 HV と同程度であった。

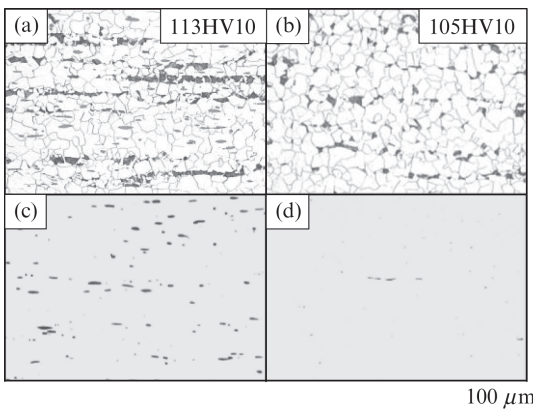


写真 1 圧延材の光学顕微鏡観察

- (a) SUM23 ミクロ組織 (b) S10C ミクロ組織
- (c) SUM23 介在物 (d) S10C 介在物

Photo 1 Optical micrographs of as-rolled steels

- (a) SUM23 Microstructure (b) S10C Microstructure
- (c) SUM23 Inclusions (d) S10C Inclusions

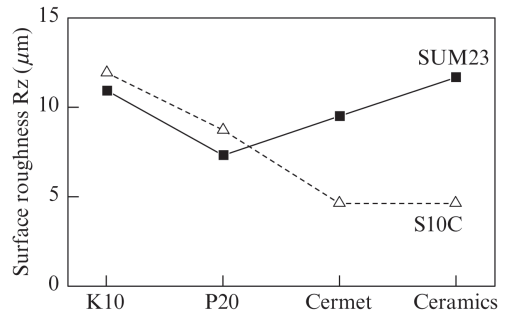


図 1 速度 70 m/min で切削後の面粗さ

Fig. 1 Surface roughness after turning: Cutting speed at 70 m/min

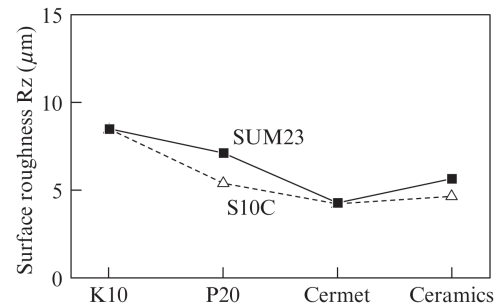


図 2 速度 100 m/min で切削後の面粗さ

Fig. 2 Surface roughness after turning: Cutting speed at 100 m/min

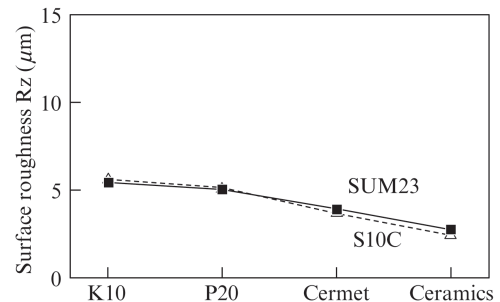


図 3 速度 200 m/min で切削後の面粗さ

Fig. 3 Surface roughness after turning: Cutting speed at 200 m/min

図 1 に速度 70 m/min で切削後の面粗さを示す³⁾。SUM23 では超硬と比較して、サーメットおよびセラミックスで切削後の面粗さが著しく増大した。一方、図 2 の速度 100 m/min での切削では、工具材種の影響が減少した。更に速度を上げ 200 m/min で切削した場合 (図 3), 工具材種の影響も更に減少した。

工具材種の影響が最も顕著であった速度 70 m/min で切削後の超硬 K10 およびセラミックス工具の外観を写真 2 に示す³⁾。超硬 K10 では SUM23, S10C ともにすくい面上に構成刃先が認められた。一方、セラミックスでは SUM23 のみに構成刃先が認められた。写真 3 にセラミックス工具でクイックストップ試験を行い、工具刃先の切屑生成状況を

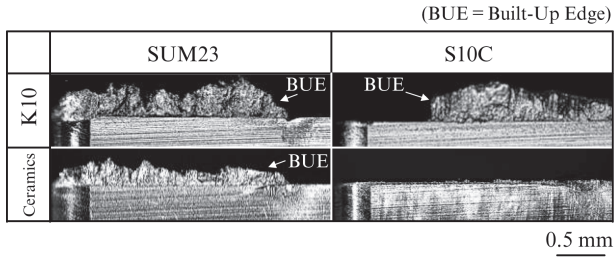


写真2 速度 70 m/min で切削後の工具
Photo 2 Tools after cutting: Cutting speed at 70 m/min

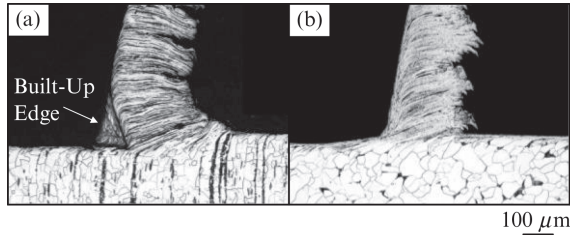


写真3 クイックストップ試験で得られた切屑生成状況 (工具: セラミックス)
Photo 3 Chip formation behavior obtained by Quick Stop test (Tool: Ceramics) (a) SUM23 (b) S10C

Photo 3 Chip formation behavior obtained by Quick Stop test (Tool: Ceramics) (a) SUM23 (b) S10C

観察した結果を示す。本結果からも SUM23 では加工点近傍に構成刃先が認められるのに対し、S10C では構成刃先が確認されなかった。以上の結果から、セラミックス工具を用い速度 70 m/min で切削した場合、SUM23 では構成刃先の生成および脱落が高頻度に生じ、その結果、面粗さが増大したと推察される。

2.3 考察

工具材種は構成刃先の生成挙動への影響を通じ、SUM23 および S10C の面粗さに影響したと考えられる。一般に、構成刃先の生成は切削温度と密接な関係があるとされる⁴⁾。この関係が面粗さに及ぼす影響を図4に整理した。構成刃先は 400℃程度までは生成しないとされる⁵⁾ (ステージ I)。400℃以上かつ被削材の再結晶温度以下 (ステージ II) では、切削温度が上昇するにつれ構成刃先の生成・成長が促進される。一方、再結晶温度よりも高温側 (ステージ III) では、切削温度が上昇するほど構成刃先の軟化・減少が進行し、更に高温側 (ステージ IV) では構成刃先が認められなくなる。このような構成刃先の生成消失挙動を受け、切削温度の上昇に従い、面粗さはステージ II では増大傾向、ステージ III では減少傾向を示すと考えられる。一方、ステージ I および IV では構成刃先が認められなくなるため、面粗さは減少し、切削温度が面粗さに及ぼす影響も小さくなると考えられる。

超硬 K10 およびセラミックスで切削後の面粗さと切削速度の関係を図5、6に示す。切削温度は切削速度と正の相関を有すると考えられる。超硬 K10 (図5) の場合、SUM23、

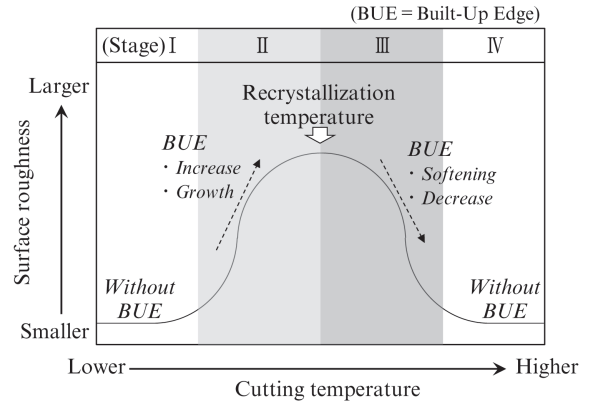


図4 面粗さに及ぼす構成刃先の生成および切削温度の影響
Fig. 4 Effect of Built-Up Edge and cutting temperature on surface roughness

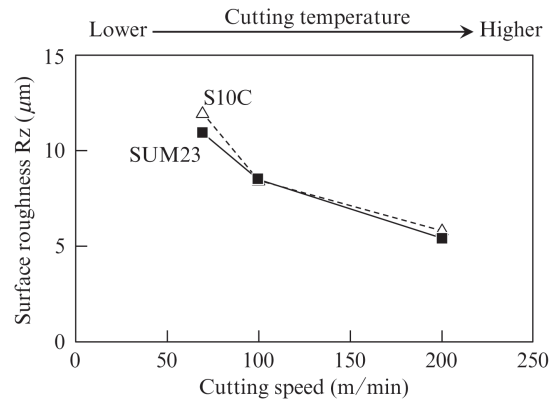


図5 面粗さと切削速度の関係 (超硬 K10)
Fig. 5 Relationship between surface roughness and cutting speed with K10

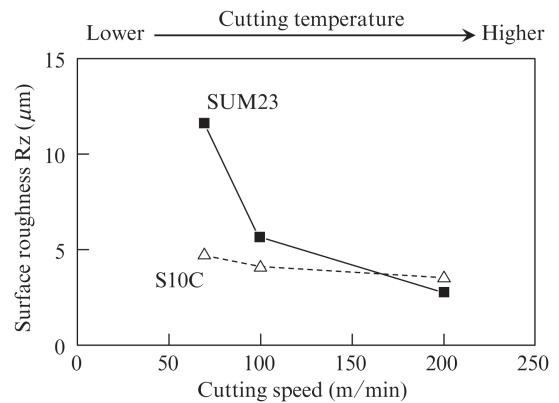


図6 面粗さと切削速度の関係 (セラミックス)
Fig. 6 Relationship between surface roughness and cutting speed with Ceramics

S10C ともに面粗さが切削速度の上昇に伴って減少しており、SUM23、S10C ともステージ III 相当の切削温度であったと考えられる。一方、セラミックス (図6) の場合、SUM23 では切削速度の上昇に伴い面粗さが減少するが、S10C では低切削速度 (70 m/min) から既に面粗さが小さく、切削速度

表4 切削温度への影響因子
Table 4 Factors on cutting temperature

No.	Factors
1	Cooling by lubricant
2	Thermal conductivity of worked material
3	Thermal conductivity of tool material
4	Cutting resistance

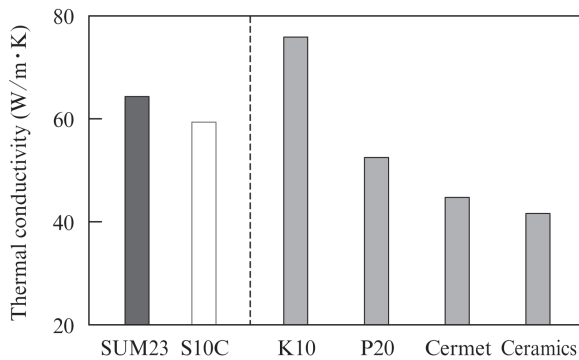


図7 熱伝導率の比較
Fig. 7 Comparison of thermal conductivity

の上昇に伴う面粗さの減少量が僅かである。これより、SUM23はステージⅢ相当の切削温度だが、S10Cではより高温のステージⅣ相当の切削温度であったと考えられる。

切削温度への影響因子を表4に整理した。図7に被削材⁶⁾と各工具材種の熱伝導率(カタログ値)を示す。SUM23よりもS10Cは熱伝導率が小さく、また、工具材種ではセラミックスの熱伝導率が最も小さい。これより、SUM23と比較してS10Cは蓄熱傾向であり、また、超硬と比較してセラミックスは蓄熱傾向といえる。図8にSUM23とS10Cの速度70 m/minでの切削抵抗(主分力)に及ぼす工具材種の影響を示す。両鋼は同程度の硬度であるにも関わらず、いずれの工具材種においてもS10Cの切削抵抗はSUM23と比較して約2倍大きい。これより、S10CはSUM23よりも切削時の発熱が大きいと考えられる。このため、蓄熱傾向のセラミックスでS10Cを切削した場合、低切削速度(70 m/min)で

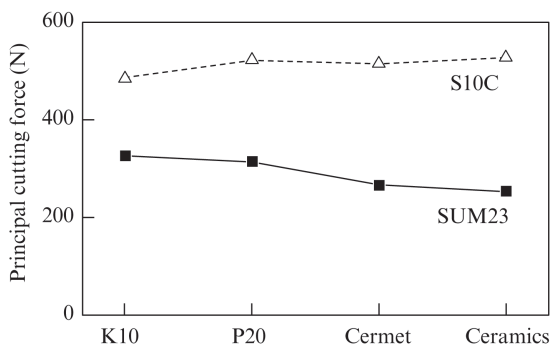


図8 速度70 m/minにおける切削抵抗
Fig. 8 Cutting resistance: Cutting speed at 70 m/min

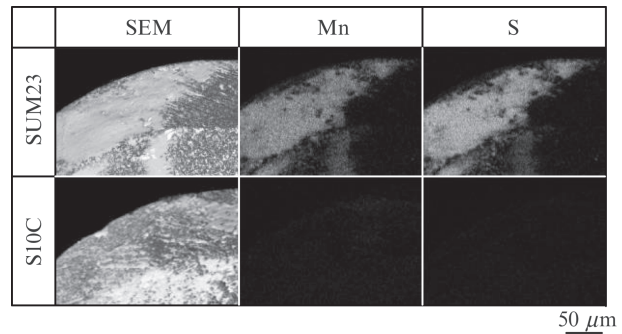


写真4 切削後の工具すくい面分析(工具:セラミックス, 速度70 m/min)

Photo 4 Analysis on rake face after cutting (Tool: Ceramics, speed at 70 m/min)

もステージⅣ域の高温切削となったと考えられる。

SUM23の低切削抵抗は、硫化物による微小亀裂の発生・伝播促進効果が主要因と考えられる。切削後の工具すくい面をSEM観察しMnおよびSの分布をEDXで分析した結果の一例を写真4に示す。SUM23の切削後には硫化物(MnS)の被膜形成が確認された。硫化物は、微小亀裂の発生・伝播促進効果に加え、工具と被削材間に被膜を形成し潤滑性を向上させることで、SUM23の大幅な切削抵抗低減に寄与した可能性がある。

3. 面粗さに及ぼす硫化物形態と降伏比の影響

3.1 実験方法

供試鋼はSUM23(0.08 C-1.2 Mn-0.06 P-0.35 S)とし、真空溶解炉で150 kg鋼塊とした後、板厚100 mmに分塊圧延した。硫化物形態および降伏比(フェライト粒径)を変化させるため、種々の温度に再加熱後、累積圧下率70%(板厚30 mm)および90%(板厚10 mm)まで圧延した。得られた板材から直径9.5 mmの丸棒を切り出し、表層から深さ1 mmの位置で硫化物を観察した。その後、画像解析により硫化物のサイズを円相当径で、アスペクト比を長さ/幅で評価した。

サイズは円相当径を、アスペクト比は長さ/幅を画像解析して求めた。面粗さは直径9.5 mmの丸棒を表5に示す条件で外周旋削した後、触針式粗さ計でRzを測定した。

降伏比は圧延材よりJIS4号試験片を切り出し、引張試験して求めた。

表5 旋削試験条件
Table 5 Turning test conditions

Tool shape	TNGN160404	Lubricant	{ Dry Wet
Cutting speed	70 m/min		
Feed rate	0.02 mm/rev	Tool material	{ Cemented carbide P20 Ceramics (Al ₂ O ₃)
Depth of cut	1 mm		

3.2 実験結果

写真5に圧延材の硫化物観察結果を、図9に硫化物サイズとアスペクト比を加熱温度で整理した結果を示す。硫化物サイズは加熱温度と累積圧下率に因らず一定の値を示した。一方、硫化物のアスペクト比は、累積圧下率70%では加熱温度によらず一定の値を示すものの、累積圧下率90%の低温(1000℃)加熱材では顕著に増大し硫化物が伸長していた。図10に降伏比と加熱温度の関係を示す。累積圧下率の増加および加熱温度の低温化により降伏比は増大した。

図11(a)に乾式切削後の面粗さを、図11(b)に湿式切削後の面粗さを示す⁷⁾。乾式では各条件で面粗さは多様な変化を示した。これは種々要因が切削温度に影響を及ぼし構成刃先の生成状況も多様に変化した結果と考えられる。乾式と比較し、湿式では総じて面粗さが低下しており、これは潤滑剤の冷却効果を受け、いずれの条件においても切削温度が著しく低温化しステージI域の切削温度となったためと推察される。

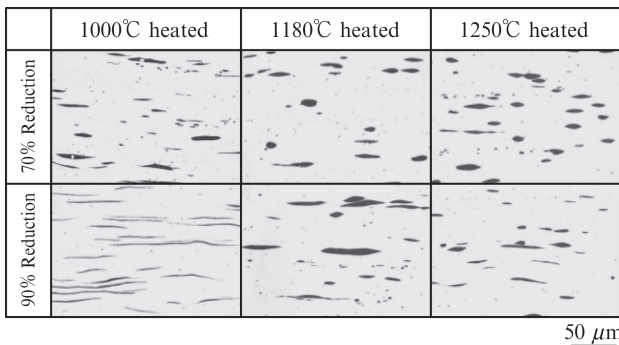


写真5 SUM23 圧延料の硫化物
Photo 5 Sulfides in as-rolled SUM23

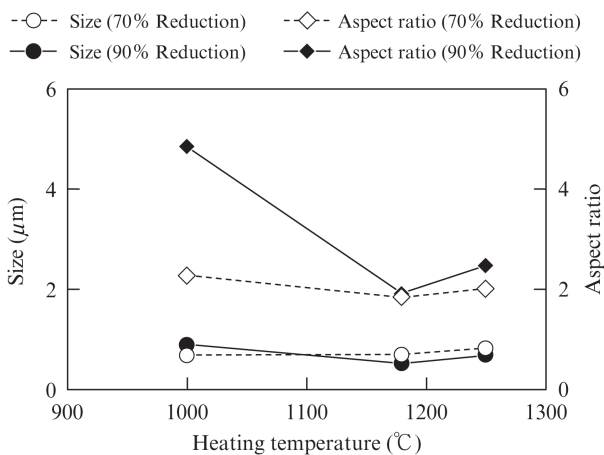


図9 硫化物サイズとアスペクト比に及ぼす加熱温度の影響
Fig. 9 Effect of heating temperature on size and aspect ratio of sulfides

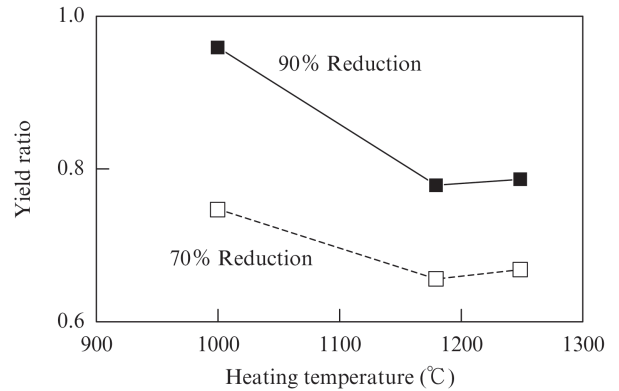


図10 降伏比に及ぼす加熱温度の影響
Fig. 10 Effect of heating temperature on yield ratio

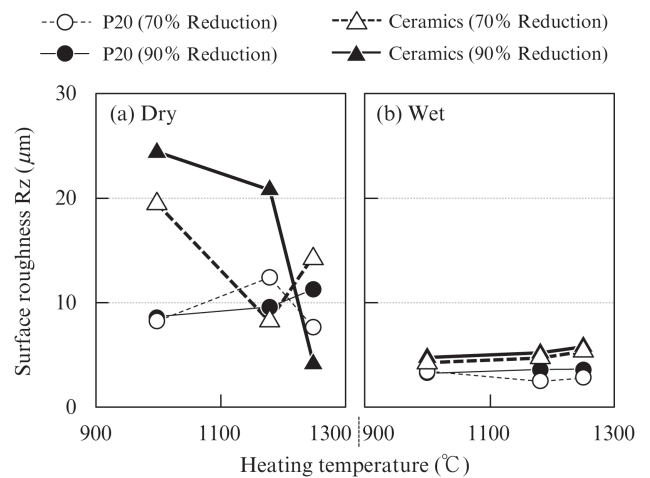


図11 切削後の面粗さ (a) 乾式 (b) 湿式
Fig. 11 Surface roughness after turning (a) Dry (b) Wet

3.3 硫化物形態と降伏比の影響

硫化物形態および降伏比が面粗さに及ぼす影響度を把握すべく重回帰分析を行った結果を表6に示す。表には因子の影響度を示す指標である|t値|の大小を併記した。超硬、セラミックスのいずれでも、また、潤滑剤の有無にもよらず、|t値|の順は硫化物サイズ>硫化物アスペクト比>降伏比となった。本検討範囲では、材料因子の影響順列に及ぼす工具材種の影響は小さいと考えられる。また、各因子係数の正負に着目すると、面粗さを低減するためには、硫化物サイズの増大、硫化物アスペクト比の減少(紡錘状化)、降伏比の増大(フェライト微細化)が有効と示された。

4. おわりに

今回、低炭素硫黄快削鋼の切削後面粗さに及ぼす工具材種の影響ならびに材料因子の影響を明らかにした。しかしながら、表1に示したように、面粗さへの影響因子は数多く、これら単独の影響に加え、組み合わせも考慮した評価検討

表6 重回帰分析結果
Table 6 Results of multiple regression analysis

Tool material	Lubricant	Multiple regression equation	Order of t
P20	Dry	$Rz = 50.3 - 47.6YR - 22.0\alpha + 3.9\beta$	$\alpha > \beta > YR$
Ceramics	Dry	$Rz = 36.1 - 4.8YR - 45.0\alpha + 6.5\beta$	$\alpha > \beta > YR$
P20	Wet	$Rz = 10.4 - 4.9YR - 7.8\alpha + 0.9\beta$	$\alpha > \beta > YR$
Ceramics	Wet	$Rz = 36.8 - 32.2YR - 22.7\alpha + 3.4\beta$	$\alpha > \beta > YR$

YR: Yield ratio
 α : Size of sulfides
 β : Aspect ratio of sulfides
 |t|: Absolute value of t ratio

が必要と考えられる。更に、被削性としては面粗さ以外にも工具寿命や切屑処理性も無視できない。この難題に応え、低炭素硫黄快削鋼の被削性を向上させるには、切削現象の本質理解を深化させる必要があり、そのためには、切削温度や切屑についての in-situ モニタリングが重要課題と考える。

参考文献

- 1) Shiraga, T. CAMP-ISIJ. 1999, vol. 12, p. 961.
- 2) JIS B 0601. Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture. 2013.
- 3) Murakami, T.; Tomita, K.; Shiraga, T. CAMP-ISIJ. 2008, vol. 21, p. 1227.
- 4) 伊藤哲郎, 阿部山尚三, 中村貞行. 精機学会春季大会学術講演前刷. 1976, p. 137.
- 5) Abeyama, S.; Nakamura, S. Machinability Testing and Utilization of Machining Data. 1979, ASM, p. 184.
- 6) 日本学術振興会・日本鉄鋼協会. 鉄鋼熱計算用数値. 1966.
- 7) Shiraga, T.; Murakami, T.; Tomita, K. CAMP-ISIJ. 2010, vol. 23, p. 1057.



今浪 祐太



富田 邦和



西村 公宏