

(解説)

## 低炭素硫黄複合快削鋼の仕上げ面粗さに及ぼす構成刃先の影響

### The Influence of Built-up Edges on Machined Surface Roughness in Low-carbon Resulfurized Free-machining Steel



家口 浩<sup>\*</sup>(Ph. D.)  
Dr. Hiroshi Yaguchi

Low-carbon resulfurized free-machining steels, which are mainly used for small components such as hydraulic use, are generally machined under built-up edge (BUE) formation conditions with the most important criterion being surface finish. It is important to clarify the effect of BUE on surface finish and the effect of metallurgical factors on BUE formation, in order to develop free-machining steels that do not require the addition of lead. This article summarizes recent investigations related to the above point of view.

まえがき = 鋼材の被削性を向上させた快削鋼には、鉛 (Pb) が添加されることが多いが、環境問題より Pb 無添加の快削鋼の開発が要望されている。そのためには、Pb や他の改善元素が、どのように被削性を改善させるかの機構を明確化することが不可欠である。

油圧部品などの小物部品に多用される低炭素硫黄複合快削鋼においても、Pb 添加鋼と同等の被削性を有する Pb 無添加鋼の開発が求められている。低炭素硫黄複合快削鋼は、JIS では SUM23 や Pb 添加の SUM24L、AISI では 1215 や 12L14 がこれに該当するが、本当の意味での快削鋼であり、被削性を最大にする成分系になっている。非常に多数の部品を効率よく製造することが要求されているので、自動盤で切削されることが多い。小物部品が多いことと、複雑な形状を一度に成形可能なハイス工具の総形バイト (フォーミング加工) が多用されることから (図 1)、比較的低速で構成刃先 (Built-up edge) が生成する条件で切削されることが多い。低炭素硫黄複

合快削鋼の被削性の最も重要な評価基準は仕上面粗さと言われている。従って、仕上面粗さに及ぼす構成刃先の影響、並びに構成刃先の生成に及ぼす冶金学的要因の影響を明確化する必要がある。本解説記事では、最近の著者らの研究結果も含めて、低炭素硫黄複合快削鋼の仕上げ面粗さに及ぼす要因についてまとめる。

#### 1. 仕上面粗さに及ぼす要因

構成刃先 (BUE) とは、写真 1 に典型的な例と図 2 に模式図を示すように、切削中に被削材の一部が工具面上に付着し、その付着物があたかも工具の一部として振舞う現象である。しかし、構成刃先と被削材は連続してお

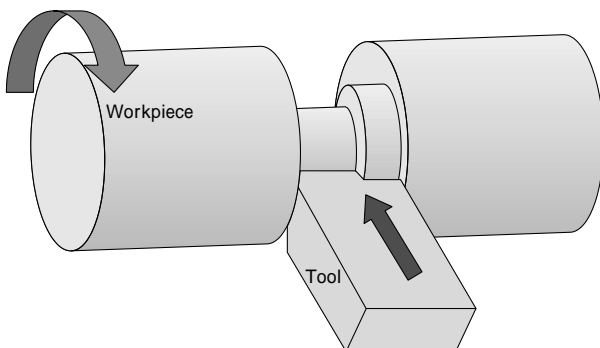


図 1 低炭素硫黄複合快削鋼の自動盤切削で多用される総形バイトを利用したフォーミング加工の模式図

Fig. 1 Schematic illustration showing complex forming tool widely used in an automatic screw machine for low-carbon resulfurized free-machining steels

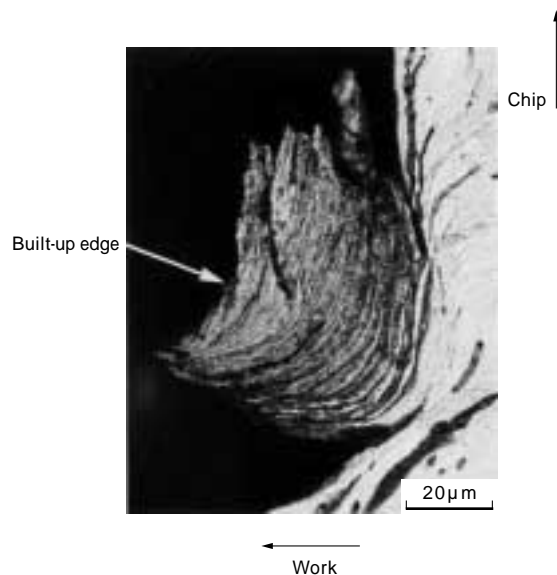


写真 1 低炭素硫黄複合快削鋼で観察される典型的なサイズが小さい構成刃先<sup>3)</sup>

Photo 1 Typical example of small built-up edge observed in low-carbon resulfurized free-machining steels<sup>3)</sup>

\*技術開発本部 材料研究所

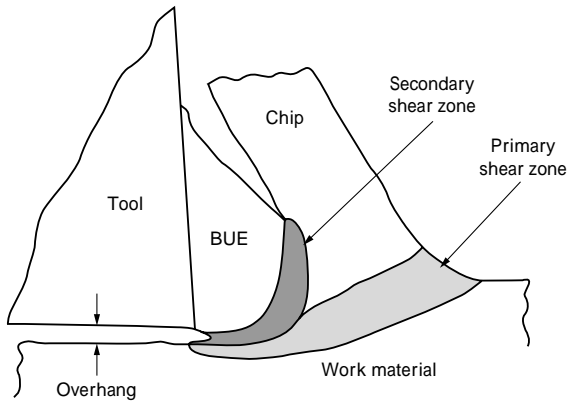


図2 構成刃先 (Built-up edge) の模式図  
Fig. 2 Schematic illustration of built-up edge (BUE)

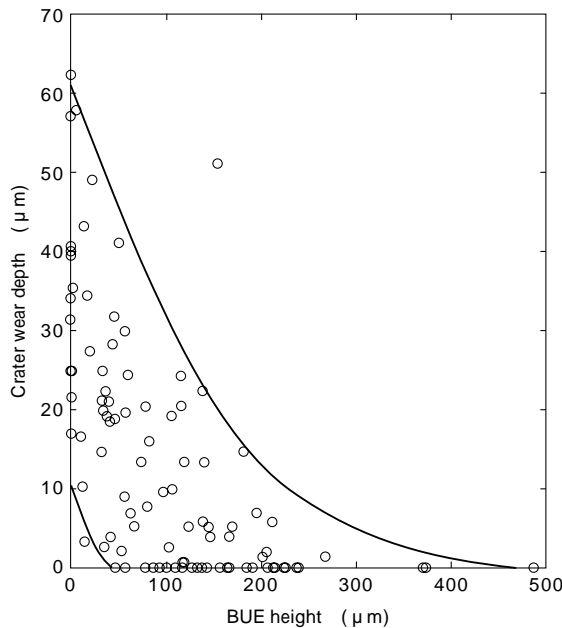


図3 構成刃先の工具磨耗保護機能 (構成刃先サイズの増加に伴って、クレータ磨耗が低減する<sup>2)</sup>)  
Fig. 3 Protecting ability of tool wear by the presence of built-up edge (The depth of crater wear decreases with increasing BUE height<sup>2)</sup>)

り、界面で大きな塑性変形を受けている。また、構成刃先の両端で微小クラックが生成することで、被削材から分離されている。写真の構成刃先中の黒い筋は、展伸されたパーライトあるいはMnS 存在物である。

構成刃先にはメリットとデメリットがある。メリットとしては、工具を覆うので図3のように工具磨耗が抑制されること<sup>1)-5)</sup>、見かけ上のすくい角が小さくなり切削抵抗が小さくなること<sup>3), 5) 6)-10)</sup>。一番の大きなデメリットは、むしろの生成による仕上げ面粗さの低下である<sup>3) 7) 10) 11)-15)</sup>。一般的にはデメリットの方が大きく、嫌われることが多いが、低炭素硫黄複合快削鋼では構成刃先が小型化し悪影響が低減されるので<sup>3) 8) 16)-18)</sup>構成刃先生成条件で使用されることが多い。

構成刃先の生成は切削条件に依存する。例えば、切削速度を低速から上げていくと、不安定な切削 (不安定な構成刃先の生成) から、安定生成、展伸された構成刃先 (構成レイヤ) を経て最後には消失する。それに伴って工具磨耗などの被削性も変化する。この変化の主な理由

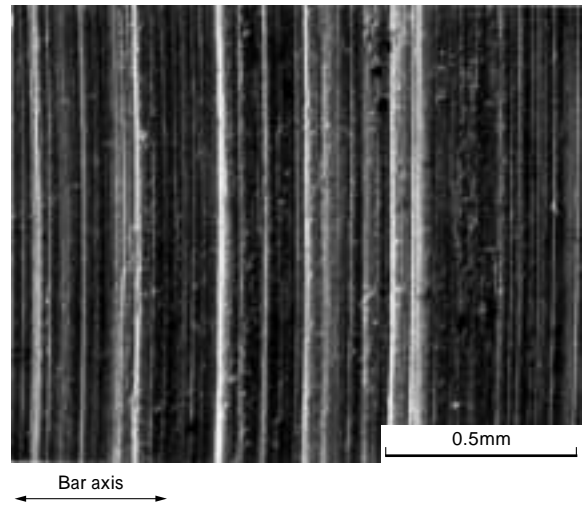


写真2 フォーミング加工後の仕上面写真 (回転軸と垂直な山と谷が形成され仕上面粗さが決定される<sup>3)</sup>)  
Photo 2 Typical example of surface after form machining (Many valleys and hills perpendicular to the bar axis can be observed which determine surface roughness<sup>3)</sup>)

は切削温度であることが知られている<sup>5) 6)</sup>。従って、構成刃先が生成する条件においては、同一切削条件においても、鋼種が変化すれば、構成刃先の状態が変化する。従って、被削性そのものも、構成刃先の状態に影響を受けるので、切削条件によっては鋼種間の被削性ランキングが変化する可能性がある。従って、構成刃先の生成条件で使用される低炭素硫黄複合快削鋼においては、構成刃先に着目することが不可欠となる。

構成刃先が低炭素硫黄複合快削鋼の仕上げ面粗さに及ぼす影響としては、一般的には構成刃先サイズで整理されることが多い<sup>19)-23)</sup>。しかし、フォーミング加工の切削面を観察すると (写真2)、回転軸と垂直な山と谷が存在し、これらのサイズ、頻度で仕上げ面粗さが決められることが分かる<sup>3)</sup>。これらの山と谷は構成刃先生成の不均一性、あるいはそれによって生成される工具磨耗状況を反映していることは明らかである。従って、仕上げ面粗さは構成刃先の大きさそのものよりも、図4のように最大と最小の差で評価した方が顕著な傾向が観察される<sup>24)</sup>。また、均一性に影響を及ぼす要因として、時間的な安定性も考慮する必要がある。

## 2. 構成刃先に及ぼす冶金学的要因

Pb, ならびに同様に被削性を向上させることが知られている類似元素のBi を添加すると、図5のように一般的に構成刃先サイズが低下することが知られている<sup>2) 3) 12)</sup>。このことから、構成刃先の小型均一安定生成が、Pb とBi が被削性を向上させている少なくとも一つの理由であることが推測できる。

Pb やBi がどのようにして構成刃先に影響を及ぼすかを調査するために、写真3に見られる切屑上に残されたスケールと呼ばれる、構成刃先から切屑上に破断したと思われるかけらを、Bi 添加鋼の切屑を題材として観察した<sup>2)</sup>。スケールの一つを拡大したものを写真4に示す。これは、SEM の反射電子線像を撮影したものであるため、Bi

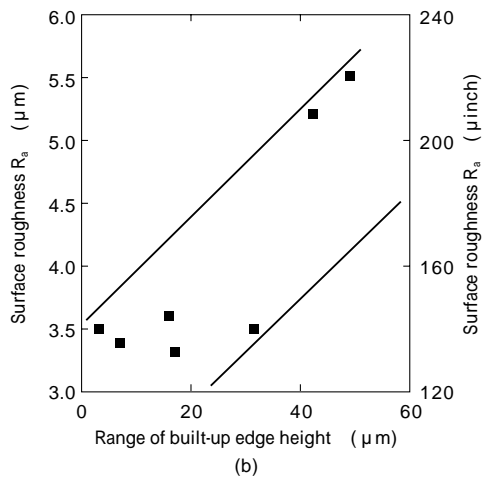
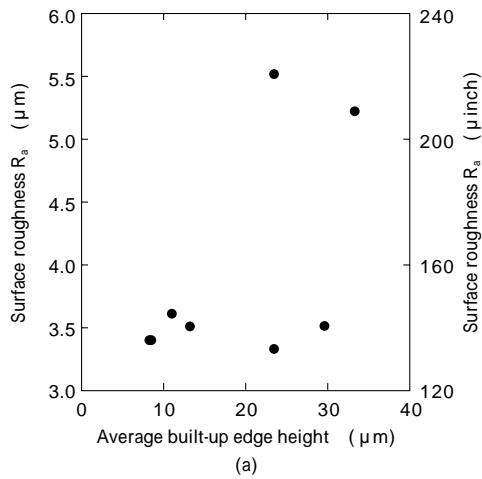


図4 フォーミング仕上面粗さに及ぼす構成刃先 (BUE) サイズの影響 (a) 平均サイズ, (b) 最大と最小のレンジ<sup>24)</sup>  
 Fig. 4 Effect of built-up edge size on form machined surface finish (a) Average, (b) Maximum-Minimum<sup>24)</sup>

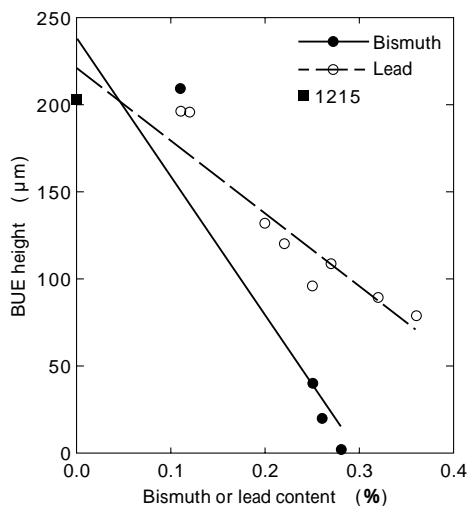


図5 構成刃先サイズに及ぼす Pb, Bi 量の影響<sup>2)</sup>  
 Fig. 5 Effect of Pb or Bi content on the size of built-up edge<sup>2)</sup>

は明るく見える。切屑本体には Bi の存在が観察されるが、スケールの中には観察されない。この現象は、EPMA による定量分析でもいくつかの例で確認された。このことは、Pb や Bi が存在しないと構成刃先は大きくなるとうとするが、ある程度大きくなった時点で機械的に不安定になる、あるいは Pb や Bi の影響で不安定な部分が剥離することで、構成刃先を小型化させるものと考えられる。

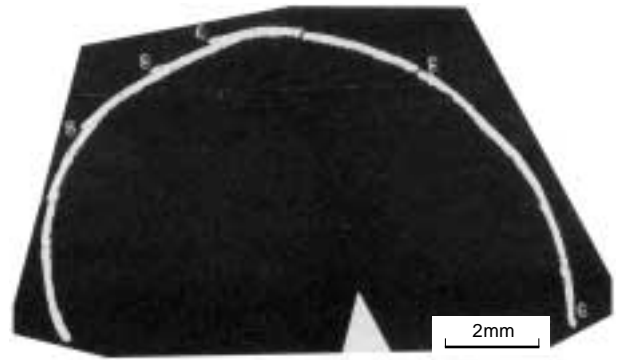


写真3 0.1%Bi 添加鋼の切屑に観察された構成刃先から脱落したと思われるスケールの例<sup>2)</sup>  
 Photo 3 Example of scales which are believed to be taken away from the built-up edge in a chip of 0.1% Bi steel<sup>2)</sup>

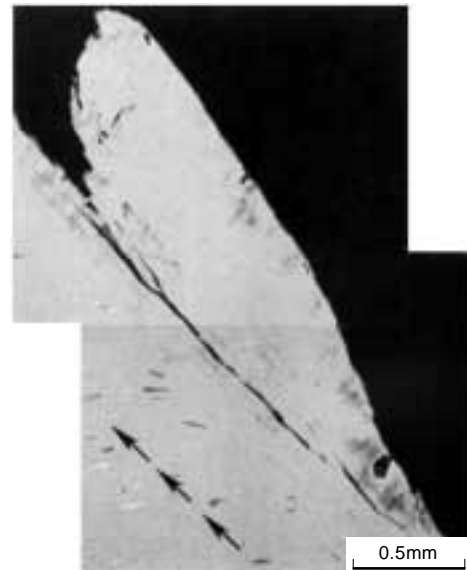


写真4 写真3で観察されたスケールのひとつの SEM 反射電子線像写真<sup>2)</sup>(Bi は明るく写るが、スケール内には観察されない)  
 Photo 4 SEM back-scattered image of one of the scales observed in Photo 3<sup>2)</sup>(Bi which appears as a bright phase is not observed in the scale)

Pb や Bi が鋼中で溶融すると溶融金属脆化で鋼材を脆化させることが知られている<sup>25)~27)</sup>。切削中には、急激な塑性変形により温度が上昇する。構成刃先が生成するときには、平均温度で 400 程度であることが報告されている<sup>20),28)</sup>。この温度は、Pb の融点 (327 )、Bi の融点 (271 ) より高いので、溶融金属脆化が起こっていることは十分に考えられる<sup>2) 3) 29) 30)</sup>。これより、構成刃先と被削材の間での微小クラックの生成を容易に起こさせて、構成刃先を小型均一安定化させると考えられる。

S 量の増加によって構成刃先サイズが小さくなることも報告されている<sup>1) 7) 9) 16) 18)</sup>。また、写真5のように、MnS を大型球状化させることで構成刃先が小さくなることも報告されている<sup>9)</sup>。図6 に一例を示すように、MnS が大型球状化した方が仕上面粗さが良好であることが知られている<sup>31)~33)</sup>、この効果も構成刃先の小型均一安定化による可能性が考えられる。

MnS が構成刃先生成に及ぼす影響を検討するために、上記と同様に切屑上のスケールを観察した。写真6 に示されるように、スケールと切屑の界面には展伸された

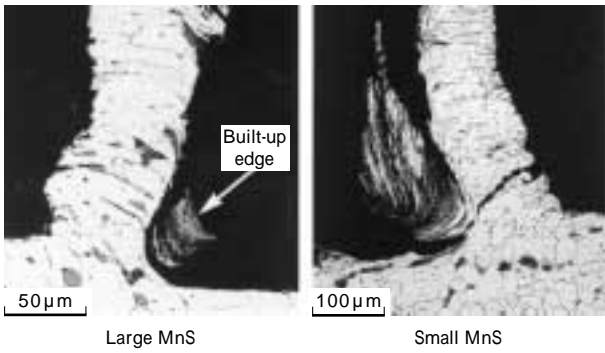


写真5 MnSサイズが異なったときの構成刃先サイズ<sup>9)</sup>  
 Photo 5 The difference in built-up edge size when the size of MnS inclusions is changed<sup>9)</sup>

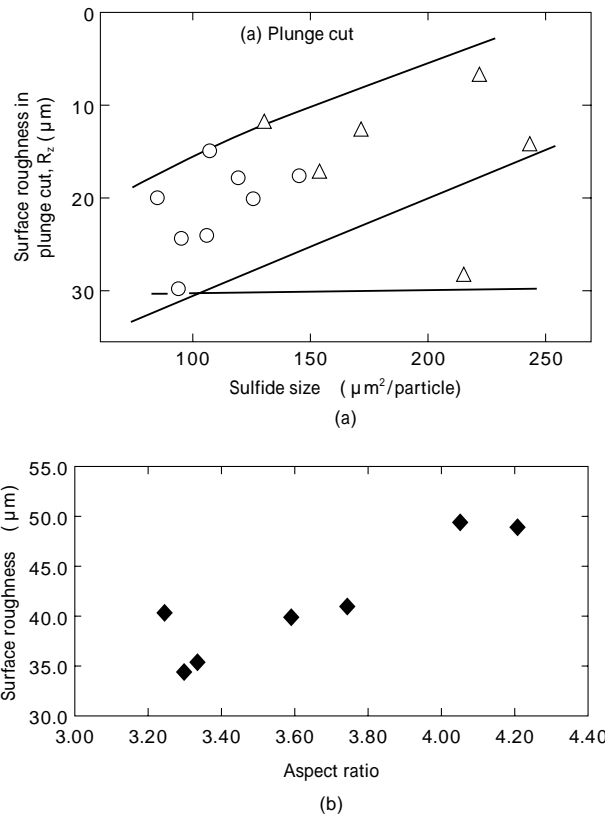


図6 MnS 介在物形態の仕上げ面粗さに及ぼす影響  
 (a) MnS サイズの影響<sup>31)</sup>, (b) アスペクト比の影響<sup>33)</sup>  
 Fig. 6 Effect of MnS inclusion morphology on surface finish  
 (a) Effect of MnS size<sup>31)</sup>, (b) Effect of MnS aspect ratio<sup>33)</sup>



写真6 切屑スケールと切屑界面に観察される展伸された MnS 介在物の例  
 Photo 6 Example of elongated MnS inclusion between the scale and chip

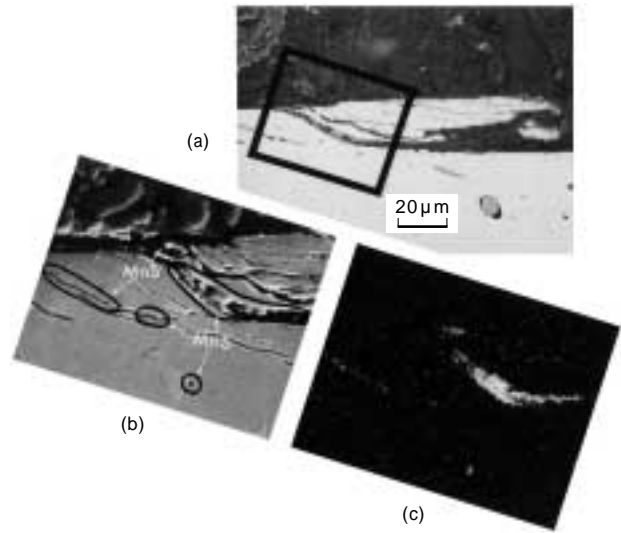
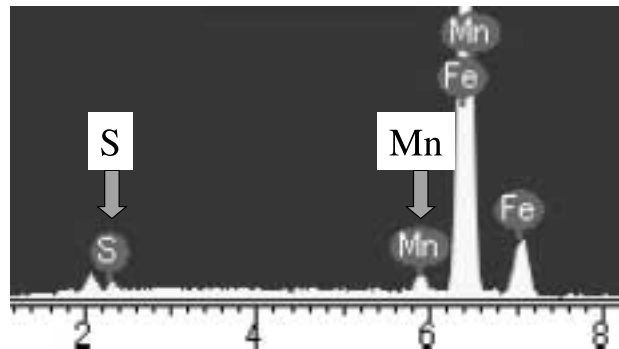


写真7 切削表面上に観察されたスケールに観察された MnS 介在物<sup>9)</sup>(a)光学顕微鏡写真,(b)SEMによる拡大写真,(c)写真(b)部の S - X線マッピング  
 Photo 7 Typical example of a scale on the machined workpiece surface associated with MnS inclusions<sup>9)</sup>(a)Optical microscopy,(b)Enlarged SEM photomicrograph,(c)X-ray map of S in (b)

MnSが存在することが観察された。写真7のように切削後の仕上面の観察においても、同様の現象が観察された<sup>9)</sup>。また、構成刃先中に MnS が濃化し<sup>34)</sup>、構成刃先の表面のでこぼこ部には、MnS が存在することも観察されている(写真8)。これらの現象は、MnS の存在が機械的に構成刃先の生成に影響を及ぼしていることを示唆している。具体的には、MnS は変形の障害となることで、構成刃先が大きくなるのを抑制していることが同われる。この効果には、大型であり、かつ変形し難い球状化 MnS の方が効果が大きいことは容易に予想できる。このことが、大型球状 MnS の方が仕上げ面粗さ改善効果が大きい理由であると考えられる。

むすび = 低炭素硫黄複合快削鋼の被削性において最も重要と考えられている仕上げ面粗さに及ぼす要因、特に構成刃先に着目して、最近の著者らの研究内容も含めてまとめた。

低炭素硫黄複合快削鋼は、構成刃先が生成する条件で



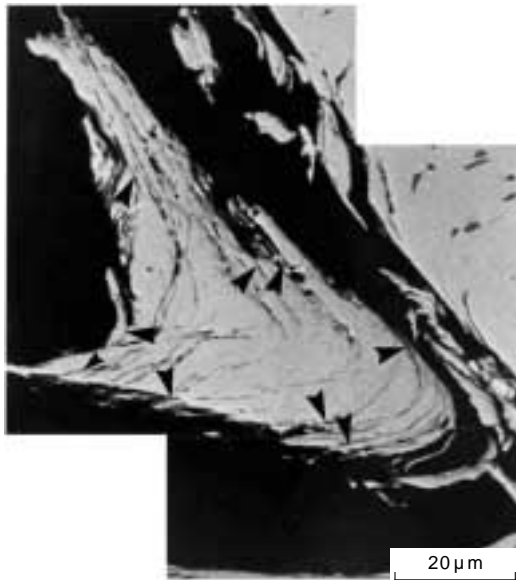


写真8 構成刃先のSEM写真(黒く展伸された筋はMnS介在物であり、構成刃先表面のざざざと対応している<sup>34)</sup>)

Photo 8 SEM photomicrograph of built-up edge (Dark lines are elongated MnS inclusions which are always associated with surface irregularities<sup>34)</sup>)

切削されることが多い。特にフォーミング加工においては、仕上げ面粗さは構成刃先の均一性、安定性に影響を受けることが明らかになった。Pb および類似元素のBiについては、切削中の温度上昇により生じる溶融金属脆化により構成刃先を安定小型化させることが重要な被削性改善機構である。MnSも微小なクラック生成の核になるなど、機械的な影響により構成刃先を小型安定化させる働きがある。この機構により、大型球状化したMnSの方が被削性向上効果が大きいことが理解される。

以上の知見をベースにPb無添加においても、低炭素硫黄複合快削鋼の仕上げ面粗さ改善に結びつけることが可能になった。

#### 参考文献

- 1) E. M. Trent : J. Iron Steel Inst., Vol.210 (1963) p.1001.
- 2) H. Yaguchi : Mat. Sci. Tech., Vol.4 (1988) p.926.
- 3) H. Yaguchi : 1st Int. Conf. Behaviour of Materials in Machining, The Inst. Metals (1988) p.24.1.

- 4) N. N. Zorev et al. : Machinability, Iron Steel Inst. (1967) p.31.
- 5) H. Opitz et al. : 8th Int. Machine Tool Design Research Conf. (1967) p.173.
- 6) V. D. Kuznetsov : Metal Transfer and Built-up in Friction and Cutting (1966) Pergamon Press, London.
- 7) M. C. Shaw et al. : J. Eng. Ind., Vol.83 (1961) p.847.
- 8) J. E. Williams et al. : Metallurgia, Vol.81 (1970) p.51.
- 9) H. Yaguchi : J. Appl. Metalworking, Vol.4 (1986) p.214.
- 10) K. L. Chandiramani et al. : J. Eng. Ind., Vol.86 (1964) p.134.
- 11) K. Nakayama et al. : Annals CIRP, Vol.14 (1966) p.211.
- 12) C. Nagai et al. : Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, ISIJ-ASM (1977) p.57.
- 13) R. Milovic et al. : J. Appl. Metalworking, Vol.2 (1983) p.249.
- 14) J. Cherry et al. : Materials for Metal Cutting, Iron Steel Inst. (1970) p.49.
- 15) M. C. Shaw : Machining - Theory and Practice, ASM (1950) p.51.
- 16) K. G. Lewis : Iron and Steel (April 1958) p.133.
- 17) E. M. Trent : J. Iron Steel Inst., Vol.201 (1963) p.847.
- 18) M. C. Shaw : Machinability, Iron Steel Inst. (1967).
- 19) R. C. Spencer : Metal Progress (February 1965) p.118.
- 20) 伊藤哲朗ほか: 精機学会春季大会学術講演前刷 (1976) p.137.
- 21) P. T. Aylward : Mechanical Working and Steel Processing Conf. IV, TMS-AIME (1969) p.309.
- 22) S. Abeyama et al. : Machinability Testing and Utilization of Machining Data, ASM (1979) p.184.
- 23) 服部 篤ほか: 電気製鋼, Vol.75 (2004) p.35.
- 24) H. Yaguchi et al. : J. Mat. Shaping Tech., Vol.5 (1988) p.231.
- 25) T. Araki et al. : Trans. Natl. Res. Inst. Met. Jpn, Vol.6 (1964) p.370.
- 26) S. Mostovoy et al. : Trans. ASM, Vol.61 (1968) p.219.
- 27) D. Bhattacharya : Conf. Embrittlement by Liquid and Solid Metals, TMS-AIME (1984) p.367.
- 28) J. Wallbank: Metals Tech., Vol.6 (1979) p.145.
- 29) H. Yaguchi : Mat. Sci. Tech., Vol.5 (1989) p.255.
- 30) 家口 浩 : 鉄と鋼, Vol.77 (1991) p.683.
- 31) S. Ohtani et al. : Conf. High Productivity Machining, ASM (1985) p.139.
- 32) 家口 浩ほか : CAMP-ISIJ, Vol.17 (2004) p.430.
- 33) 阿南吾郎ほか : CAMP-ISIJ, Vol.17 (2004) p.431.
- 34) H. Yaguchi : Mat. Sci. Eng., Vol.80 (1986) p.L27.