

## 非鉛快削鋼の開発と切削技術

## Development of Lead-free Free-cutting Steel and Cutting Technology

渡 里 宏 二\*  
Koji WATARI岩 崎 竜 也  
Tatsuya IWASAKI間 曾 利 治  
Toshiharu AISO

## 抄 録

環境負荷物質低減の動きが広がっている中で、特殊鋼の分野では鉛快削鋼の非鉛化が進んでいる。そこで新日鐵住金(株)では機械構造用鋼と低炭快削鋼について、それぞれに求められる被削性に応じて非鉛快削鋼を開発した。前者は切りくず処理性と工具摩耗、後者は表面粗さについて、鋼中の非金属介在物、特に MnS の形態を制御することで鉛快削鋼と同等の被削性を達成した。その開発の考え方と開発鋼の評価結果について、鉛快削鋼の被削性メカニズムの明確化とともに紹介した。

## Abstract

Recently, it is expected to improve machinability without the addition of lead from the point of view of environmental issues. Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation has developed two types of lead-free free-cutting steel. One of the developed steels is for carbon steel for machine structural use with good chip breakability and tool life. The other is for low carbon free-cutting steel with excellent finished surface after machining. For both steels, the shape control technology of MnS inclusions is used to achieve machinability equal to that of leaded free-cutting steel. This paper introduces the development strategy of the lead-free free-cutting steels based on the understanding of the role of lead inclusions in leaded free-cutting steel.

## 1. 緒 言

1990 年代後半頃から、環境負荷物質低減の観点で世界的に鉛の使用が制限される傾向になった。代表的な規制例として、廃電気電子機器指令 (Waste from Electrical and Electronic Equipment Directive : WEEE 指令)、電気電子機器の有害物質使用制限指令 (Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment : RoHS 指令)、及び廃自動車指令 (End-of Life Vehicles Directive : ELV 指令) が欧州で制定され、鉛を含む特定有害物質の使用が制限され始めた。

本来、鉛の含有量が 0.35 重量% (以下%と記載) 以下である鉛快削鋼は、RoHS 指令において鉛規制対象に該当する。一方で、鋼材への鉛添加により高い被削性を付与できることから、切削加工における動力負荷が低減され、省エネルギー対策としての効果も期待できるとの主張もあり、現時点で鉛快削鋼は同指令の適用除外となっている。しかし、国内の自動車メーカーや部品加工メーカーにおいては、各社独自に鉛の使用を規制する気運が高まり、鉛快削鋼に

代わる“非鉛快削鋼”の開発が求められている。

これまで、国内鉄鋼メーカー各社で独自の開発思想により開発が進められている<sup>1)~10)</sup>。現時点で、快削鋼における非鉛化技術には、①硫黄快削鋼の MnS の活用と、② MnS 以外の非金属介在物や析出物の活用、の大きく 2 種に区別される。新日鐵住金(株)では、これまでに前者の技術を主眼に研究、開発を進めてきた。またその中で独自の被削性評価技術も確立してきている。ここでは、過去の報告も踏まえながら新日鐵住金における被削性改善に向けたこれまでの取り組みについて紹介する。

## 2. 快削鋼の非鉛化に向けた考え方

快削鋼はその用途によって 2 種に区別される。一つは、自動車の駆動系や足回りに使用される“機械構造用鋼”で強度特性を維持、向上させつつ被削性も兼ね備えなければならず、強度と被削性の両立が求められる。一方で、快削元素である Pb や S は鋼中に介在物として存在し、量や大きさによっては破壊の起点となるために、多量添加はできず、現状は Pb で 0.2%, S で 0.1% 程度が上限である。もう

\* 鉄鋼研究所 棒線研究部 主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

一つは、強度よりも製品の加工精度が求められる OA 機器や油圧部品に使用される、いわゆる JIS 規格の SUM で分類される“低炭素快削鋼”である。これらはとにかく高い被削性が求められるために Pb や S の 0.3% 程度の添加が許される。

このように両鋼種で求められる被削性は異なる。すなわち、前者は快削元素の量が制限されるために、切りくずが分断され難くなるために、ユーザーの量産工程において切りくず処理性が課題となる。特に鉛は切りくずの分断性を高める効果があり、非鉛化による同性能の改善は必須となる。また後者は、多量の快削元素によって非金属介在物の分散量も多く切りくず処理性は問題にならないが、その適用部品の特徴から加工品の仕上げ精度が求められ、表面粗さが重要視される。これらの観点から新日鐵住金は非鉛快削鋼の開発にあたり、先んじてそれぞれの鋼種における鉛の被削性改善メカニズムの解明に取り組んだ。

まずは、機械構造用鋼について述べる。図 1<sup>1)</sup>に S55C をベースにした鉛添加の有無による二次元切削時の高速度カメラによる動画の 1 コマ及び得られた切りくずの外観を示す。工具は超硬合金の P20 種を使用した。鉛を添加していない Steel A は、高速度カメラによる観察から、工具切れ刃が被削材に食い込んだ後、切りくずがすくい面上でせん断角が連続的に小さくなりながら堆積し、最終的に刃先先端から切りくずの一次せん断域に沿って破断に至っている。これが周期的に繰り返され、せん断型切削機構に類似している。一方で、鉛を添加した Steel B では切りくずのカーブ径が小さくなり、厚さ変化も小さいことから流れ型切りくずを形成している。このような鉛添加により切りくずの形状変化を検証すべく、走査型電子顕微鏡 (SEM) 内での切削試験による鉛添加鋼の切りくず生成機構を調査した。

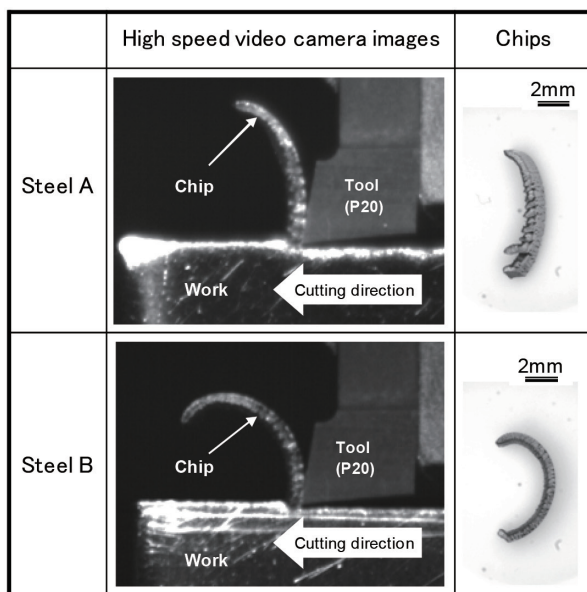


図 1 二次元切削の高速度カメラ観察とその切りくず  
In-situ observation of orthogonal cutting and chips

その結果を図 2<sup>1)</sup>に示す。工具が進むにつれて鉛介在物が一次せん断域でせん断方向に沿って変形し、これを起点にき裂あるいはすべり線が発生していることがわかる。このように鉛はせん断域でせん断すべりを助長し、ひいてはき裂の発生に繋がり、切りくずにおける母材のひずみを抑制していると判断できる。このことから鉛の被削性改善効果は、従来から提唱されている低融点金属であるが故のすくい面での摩擦力の低下だけではなく、鉛の高い可塑性による切りくずせん断域の変形抵抗低減に伴う切りくず形成の安定化への寄与であると解釈した。

次に、低炭素快削鋼における鉛の面粗さ改善効果について述べる。図 3<sup>1)</sup>に鉛快削鋼 (SUM24L) の二次元切削途中止め実験によって得られた工具刃先の近傍に形成した構成刃先 (Built-Up Edge: BUE) 周辺の SEM 観察結果を示す。構成刃先上部のせん断域で、工具のすくい面で摩擦により生じたせん断歪をうけた MnS から構成刃先に向かってき裂が発生している。加工前の母材に鉛介在物が MnS の周囲に晶出していることはよく知られており、鉛がこのき裂

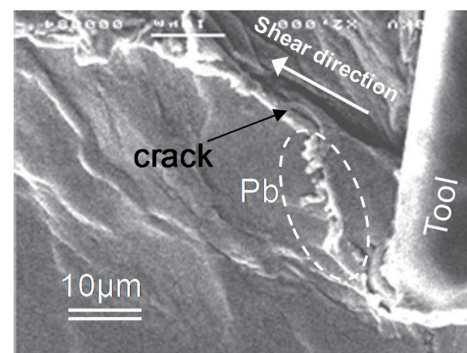


図 2 鉛快削鋼の SEM 内切削による一次せん断域でのき裂発生状況

Crack initiation at the primary shear zone by orthogonal cutting in SEM on leaded steel

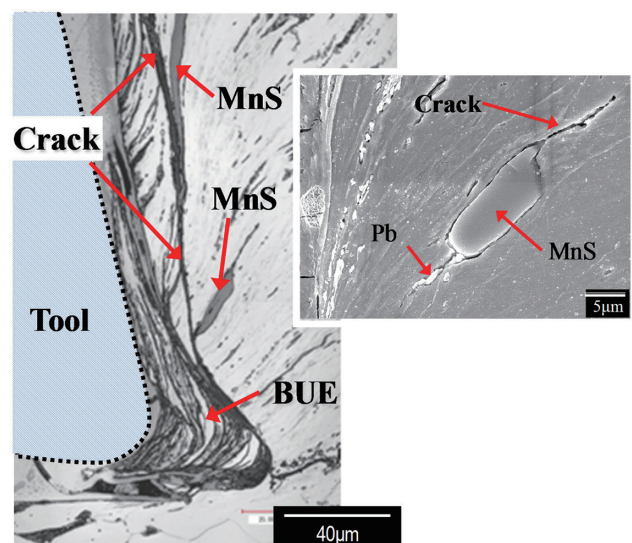


図 3 鉛快削鋼における構成刃先の微視的組織観察  
Microstructure in the vicinity of built-up edge in SUM24L steel



の発生を助長し、構成刃先の成長を抑制していると考えられる。

また、この構成刃先はCが濃化した硬質な微細フェライト組織であることも判明した。構成刃先が粗大化すると加工中の生成、脱落によって加工面の性状が低下することはよく知られており、SUM系の鉛快削鋼における粗さの改善効果は、切削中に刃先先端に形成する構成刃先が、鉛やMnSの介在物を起点に発生する構成刃先周辺のき裂によってその成長が抑制され、その結果、理想的な刃先状態を維持されることで、加工面側の性状が改善すると判断した。

以上の技術思想をもとに、MnSの形態制御によって非鉛快削鋼の開発に取り組んだ。その開発事例を次章で紹介する。

### 3. 非鉛快削鋼の開発

#### 3.1 機械構造用非鉛快削鋼

前章で述べた通り、機械構造用快削鋼では切りくず処理性の改善が主な課題であり、高速度カメラ観察によって明らかにされた鉛快削鋼の切りくず生成機構から、せん断変形域での変形抵抗の抑制が鍵となる。S量を変化させずに非金属介在物起点で起こるせん断変形の抵抗を低減する手法として、MnSの微細化に着目した。新日鐵住金が開発した機械構造用の非鉛快削鋼（スミグリーンS）<sup>13,14)</sup>は、製鋼プロセスの精緻なコントロールによってMnSを微細化し、鉛快削鋼と同等の切りくず処理性を得ることが可能となった。その結果を、図4に示す。またCa処理との併用で酸化物系非金属介在物の低融点化も可能であり、耐工具摩耗性の向上との両立が可能となった。

本開発鋼はユーザーからの高い評価を得ており、クランクシャフトなどの部品に既に実用化されている。

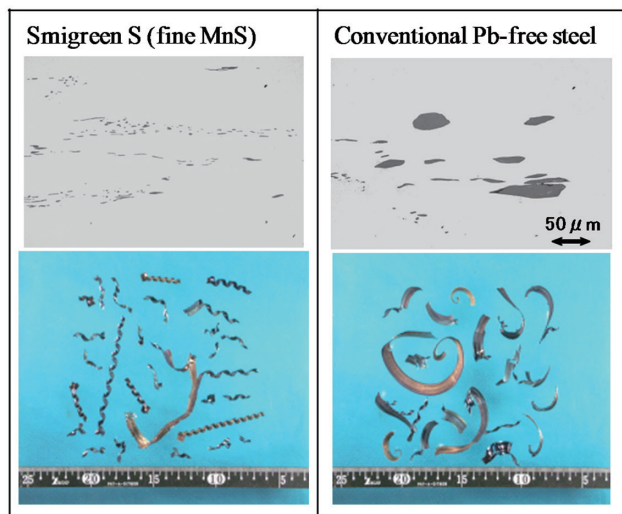


図4 開発鋼（スミグリーンS）と非鉛快削鋼のMnS形態と切りくずの比較

Comparison of MnS morphology and chips between developed steel (Smigreen S) and conventional Pb-free steel

#### 3.2 低炭素非鉛快削鋼

低炭素快削鋼では快削元素が多く含有されていることで非金属介在物も多量に分散していることから、切りくず処理性は大きな問題にならない。課題は、前章での切削途中止め実験によって判明した、構成刃先の成長抑制による加工品の仕上げ面粗さの低減である。新日鐵住金では、本課題に対応して2種の開発鋼を保有している。

まずは前報<sup>15)</sup>の内容について簡単に紹介する。この開発鋼では、Sを従来の0.3%から増量し、加えて製造条件の制御により、図5に示す通り、サブミクロンサイズの微細なMnSを析出させている。特にこの微細なMnSが加工中に形成する構成刃先内に取り込まれることで、構成刃先そのものが脆化し粗大な構成刃先形成を抑制することが可能となった。

もう1種の開発鋼は上記のS量を超える0.5%以上という従来にみられない高いレベルで含有させ、新日鐵住金独自の製鋼技術によってMnSの形態として長径と短径の比（アスペクト比：L/W）の小さい状態で均一に分散させている。図6<sup>16)</sup>に開発鋼のMnSを観察した光学顕微鏡写真と画像解析によって調べたMnS粒子のアスペクト比の分布を示す。このMnSを均一かつ多量に分散させるために、スラグ精錬段階で溶鋼中の酸素含有率やS含有率の減少速度を適切に制御した<sup>17)</sup>。加えて、連続铸造時のMn及びSそれぞれのミクロ偏析挙動について解析し、この高S鋼に応じた適切なMn量を設定することで铸件の内部割れも

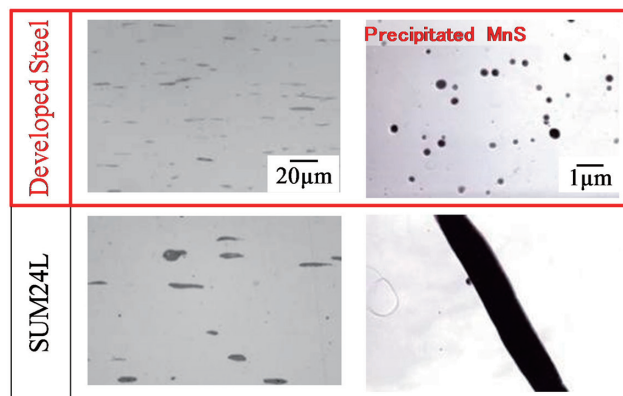


図5 開発鋼と鉛快削鋼（SUM24L）のMnS形態比較  
Comparison of MnS morphology between developed steel and SUM24L steel

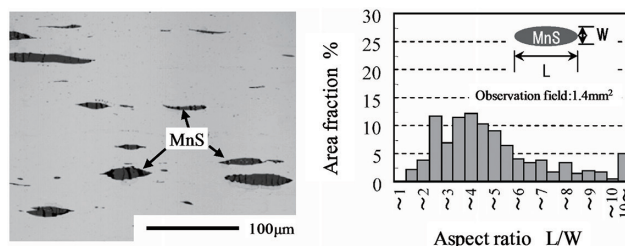


図6 低炭快削鋼における開発鋼のMnS形態  
MnS morphology of developed steel in low carbon free-cutting steel

防止した。

開発鋼の被削性を実部品の量産加工で評価した結果の一例を図7に示す。開発鋼は異なった加工条件、すなわちNC旋盤による旋削加工で加工されるOA機器部品でも、あるいは多軸自動盤による溝入れ加工で加工される自動車部品においても、従来の低炭素鉛快削鋼と同等以上の良好な表面粗さが得られ、切りくず処理性も問題ないことが確認できた。この高S鋼で、単にSを増量するだけでなく低アスペクト比で紡錘状に制御されたMnSが表面粗さの改善に効果的であったメカニズムについて、小型真空溶解炉による試作材でBUEの形成に着目して検討した。

構成刃先とその周囲の微細組織の観察には、図8に示すような切削加工の途中で工具を高速に抜き取ることで切削加工の状態を凍結させる“切削急速停止装置”を活用した。図9<sup>16)</sup>に脱酸調整により変化させた高S鋼のMnSの分散形態と切削速度50m/minで得られたそれぞれの構成刃先近傍の断面マイクロ組織を示す。図9(a)のMnSが粗大で紡錘状の鋼では構成刃先は約40 $\mu\text{m}$ と小さく、この構成刃先の周囲では前述の鉛快削鋼の結果と同様に、紡錘状のMnSを起点としてマイクロクラックが多数発生しており、その一部は構成刃先と切りくずの境界にまで達していることが観察された。

一方、図9(b)の微細・伸長形状MnS鋼の構成刃先は、幅が200 $\mu\text{m}$ 以上と大きく成長しており、構成刃先と切りくずの境界近傍にマイクロクラックは観察されるものの、構成刃先と切りくずを分断しているような様子は観察されず、構成刃先の成長を抑制できていないことがわかる。すなわち、本観察からMnSの形態によってマイクロクラックの発

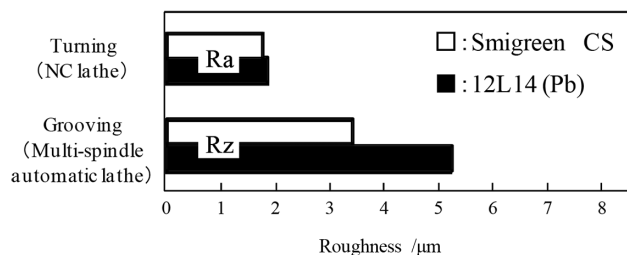


図7 開発鋼(スミグリーンCS)の被削性  
Machinability in developed steel (Smigreen CS)

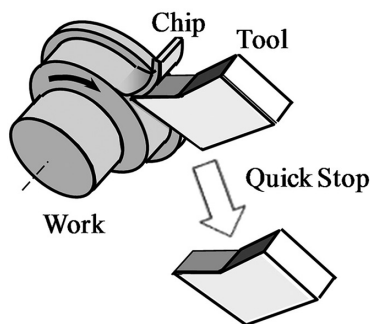


図8 切削急速停止実験の模式図  
Schematic illustration of quick stop test in cutting

生挙動が異なり、これが構成刃先の成長に影響を及ぼしていることが判明した。このMnS制御技術を開発鋼に適用したことで前述の高い表面粗さを確保することに成功した。

以上の開発鋼の考え方を図10に模式的に示す。両鋼は

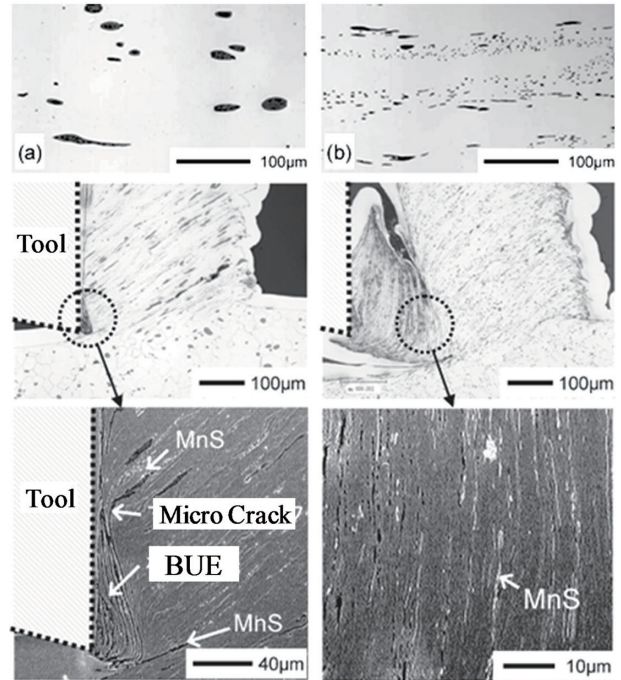
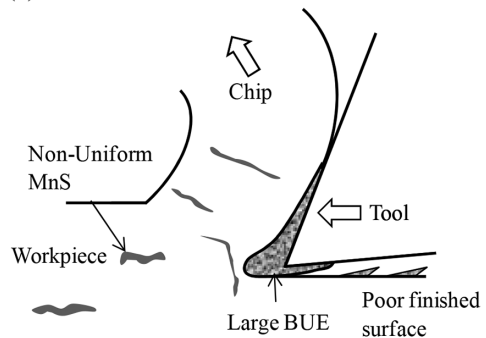


図9 MnS形態による構成刃先形成への関係  
Effect of MnS morphology on BUE formation

(a) Conventional Pb-free steel



(b) Developed Pb-free steel

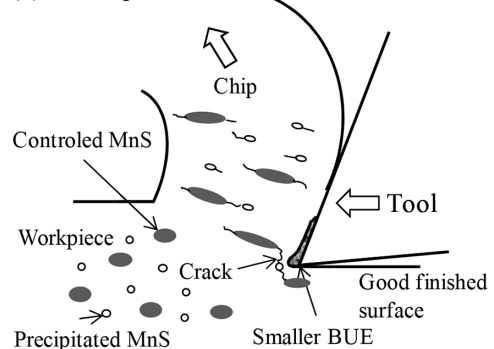


図10 構成刃先形成におけるMnS形態の影響の模式図  
Schematic illustration showing effect of MnS morphology on BUE formation



既に優れた顧客先評価を得ており、前者はEZ 鋼、後者はスミグリーン CS 鋼として実用化している。本鋼は、自動車関連や OA、家電関連分野で使用され、その適用部品は多岐にわたるため、更なる適用拡大に向け推進中である。また、平成 27 年度文部科学大臣表彰の科学技術賞（開発部門）を受賞した。

#### 4. 高硬度鋼の切削技術

本章では近年注目されている焼入れ鋼の切削加工、いわゆる“ハードマシニング”を対象に、その新日鐵住金での取り組み状況を紹介する<sup>18,19)</sup>。

歯車などの高い強度が要求される部品には、表面硬化処理が施されることが多い。例えば浸炭層は、硬さが 700HV を超える高炭素鋼の焼入れ組織であり、難削材の一つとして知られている。このような鋼を切削加工する際には、立方晶窒化ほう素（cBN）を焼結した工具が用いられるが<sup>20)</sup>、cBN 工具の摩耗に及ぼす合金成分の影響を検討した例はほとんど無い。そこで、主要な合金元素である Si の添加量を変化させた鋼の焼入れ材を用いて旋削加工を行い、工具摩耗に及ぼす鋼中 Si の影響を検討した結果を以下に示す。

供試材には、SCr420 をベースに、浸炭層を模擬して C 添加量を 0.8% に高め、Si 添加量を 0.2% と 1% とした 2 鋼種を用いた。図 11 に、0.2%Si 鋼 (a) 及び 1%Si 鋼 (b) の光学顕微鏡組織を示す。いずれの鋼種も、マルテンサイトと残留  $\gamma$  から成る典型的な高炭素鋼の焼入れ組織である。また、硬さはそれぞれ 720HV 及び 725HV、残留  $\gamma$  体積率はそれぞれ 22% 及び 24% であり、鋼種間で大きな差異はなかった。

図 12 に、0.2%Si 鋼 (a) 及び 1%Si 鋼 (b) を 5 分間切削した工具の逃げ面を、走査型電子顕微鏡・エネルギー分散型 X 線分光法（SEM-EDS）で観察した結果を示す。点線で囲まれた領域は、切削によって工具が摩耗もしくは損傷した部分である。1%Si 鋼に関しては摩耗部と損傷部の境界を実線で示す。0.2%Si 鋼においては、逃げ面が一樣に摩耗しており、安定的に切削が実施されたことがわかる。一方 1%Si 鋼においては、図中の右側で大きく工具が欠けており、5 分間の切削に耐えられなかった。また、いずれの鋼種においても摩耗部には凝着物が観察された。EDS 分析の結果、凝着物の成分は、0.2%Si 鋼では Fe であり、1%Si 鋼では Fe と Si から成ることがわかった。したがって、Si 濃度が高い鋼材では工具成分との相性により凝着が促進し、摩耗の進行とともに刃先の強度が低下し、1%Si 鋼で工具刃先に欠けが生じたと考えられる。

以上のように、組織や硬さに差異が無くとも、鋼材成分の微妙な変化によって被削性は大きく変化する。したがって、各種合金元素が被削性に及ぼす影響を明らかにし、部品の性能を劣化させずに被削性を改善できる鋼を開発する

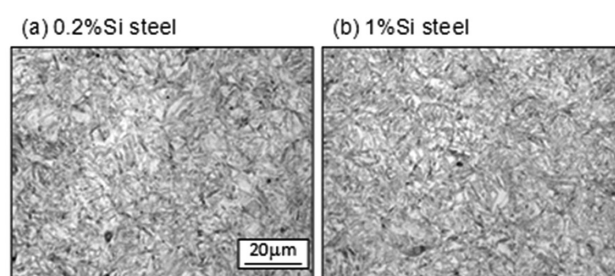


図 11 切削試験片の光学顕微鏡組織  
Microstructure of test pieces

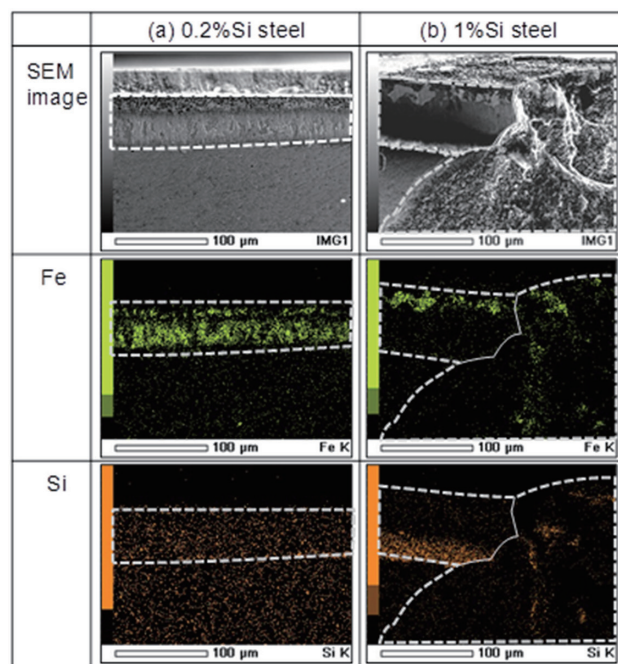


図 12 切削後の工具逃げ面の SEM-EDS 観察結果  
SEM images of flank wear land and corresponding EDS analysis results

ことが、今後の大きな研究課題である。

#### 5. 結 言

環境負荷物質である鉛の低減に向けた非鉛快削鋼の開発について報告した。現状快削鋼に関する鉛の規制については適用除外となっているが、今後各国でその整備が進むことが予想され、その範囲も徐々に広がっていくと考えられる。新日鐵住金は、これまで非鉛快削鋼の開発に正面から取り組んできており、これらは新日鐵住金棒線事業ブランド SteelLinC®（スティーリンク）の下で開発強化している高機能商品群 XSTEELIA®（エクステーリア）の代表的な商品である。また、この開発過程において、新日鐵住金独自の評価・解析技術を構築してきており、切削加工におけるソリューション技術 SYNERGIA®（シナジア）による提案で、材料特性にあわせた顧客の切削条件の最適化にも貢献していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 狩野隆, 次井慶介, 中村貞行: Ca+S 系介在物形態制御型快削鋼. 電気製鋼. 71 (1), 89 (2000)
- 2) 家口浩, 土田武広, 新堂陽介, 坂本浩一, 染川雅美, 鹿磯正人: 介在物形態制御タイプ鉛フリー快削鋼. 神戸製鋼技報. 52 (3), 62 (2002)
- 3) 坂本浩一, 家口浩, 杉村朋子, 阿南吾郎, 吉田敦彦, 辻武司: Pb フリー低炭素硫黄快削鋼の開発. 神戸製鋼技報. 56 (3), 35 (2006)
- 4) 岩間直樹, 常陰典正, 大庫和孝, 河本剛: 鉛フリー快削鋼の開発. 自動車技術. 57 (11), 59 (2003)
- 5) 橋村雅之, 平田浩, 蟹沢秀雄, 内藤賢一郎: クランクシャフト用 Pb-free 非調質鋼について. 新日鉄技報. (378), 68 (2003)
- 6) 松井直樹, 渡里宏二: Ca 添加機械構造用鋼の切削における超硬工具摩耗抑制効果. 鉄と鋼. 91 (8), 639 (2005)
- 7) 橋村雅之, 宮本健一郎, 広角太郎, 宮西慶: 環境にやさしい低炭非鉛快削鋼の開発. まてりあ. 46 (2), 105 (2007)
- 8) 岩間直樹, 内山雅夫, 大脇進, 熊谷憲一, 大庫和孝, 内藤国雄: CAMP-ISIJ. 12, 1387 (1999)
- 9) 渡里宏二, 垣見治則, 松本斉: Ti を添加した高強度クランク軸用 Pb フリー快削非調質鋼の開発. まてりあ. 41 (1), 57 (2002)
- 10) 村上俊之, 白神哲夫: Pb フリー BN 快削鋼. NKK 技報. (178), 21 (2002)
- 11) 渡里宏二, 藤原順介, 岩見潤: 機械構造用炭素鋼の切りくず形態に及ぼす鉛の影響. 精密工学会誌. 76 (3), 294-298 (2010)
- 12) 松井直樹, 長谷川達也, 藤原順介: 低炭素快削鋼の構成刃先の成長に及ぼす介在物形態の影響. 精密工学会誌. 76 (10), 1166-1170 (2010)
- 13) 松本斉: 鉛フリー快削鋼スミグリーン S 鋼, T 鋼. 特殊鋼. 51 (5), 50 (2002)
- 14) 鈴木大輔, 長谷川達也: 鉛フリー快削鋼スミグリーン S 鋼, スミグリーン X 鋼. 特殊鋼. 53 (5), 46 (2004)
- 15) 橋村雅之, 宮西慶, 水野淳: 環境にやさしい低炭非鉛快削鋼の開発. 新日鉄技報. (386), 42-46 (2007)
- 16) 松井直樹, 岡山敦, 加藤徹, 長谷川達也, 藤原順介: 被削性に優れた低炭素快削鋼「スミグリーン CS」の開発. まてりあ. 50 (2), 73-75 (2011)
- 17) Okayama, A., Nishi, T.: Metallurgical Reaction between Top Slag and Sulfur-bearing Molten Steel. Proc. AISTech 2008. 1, AIST, 2008
- 18) 岩崎竜也, 渡里宏二: 焼入れ鋼の切削における工具摩耗におよぼす合金元素の影響. CAMP-ISIJ. 27, 803 (2014)
- 19) 岩崎竜也, 渡里宏二: 焼入れ鋼切削加工時の工具摩耗に及ぼす鋼中 Si の影響. CAMP-ISIJ. 28, 764 (2015)
- 20) 中井哲男: CBN, ダイヤモンドによる難削材の切削加工. 精密工学会誌. 58 (12), 1953-1956 (1992)



渡里宏二 Koji WATARI  
鉄鋼研究所 棒線研究部 主幹研究員  
博士(工学)  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



岩崎竜也 Tatsuya IWASAKI  
鉄鋼研究所 棒線研究部 研究員



間曾利治 Toshiharu AISO  
鉄鋼研究所 棒線研究部 主任研究員