

環境にやさしい低炭非鉛快削鋼の開発

Development of Low Carbon Lead-Free Free-Cutting Steel with Paying Attention to Environment

橋 村 雅 之^{*(1)} 宮 西 慶^{*(2)} 水 野 淳^{*(3)}
 Masayuki HASHIMURA Kei MIYANISHI Atsushi MIZUNO

抄 録

低炭快削鋼はその切削仕上げ面精度に優れていることから、精密部品に多用されているが、その多くに環境負荷物質として注目されている鉛が添加されている。そこでこの非鉛化を目的として、低炭非鉛快削鋼を開発した。開発鋼では微細なMnSを鋼中に大量に分散させることで、鉛の有する潤滑と脆化機能を代替し、従来の鉛快削鋼と同等以上の被削性を得た。その開発の考え方と被削性評価結果を紹介した。

Abstract

Conventionally, low carbon free-cutting steels are added lead (Pb) in order to cut the complicated and precise configurations of various parts such as hydraulic devices for automobiles and the precision parts of OA equipment. In these parts, the first priority in developing lead-free free-cutting steel is not only to facilitate high-efficiency cutting but also to provide, without using lead, an extremely smooth finished surface after machining. This paper introduces the developing strategy and the machinability of the developed low carbon lead free free-cutting steel.

1. はじめに

近年の環境問題の高まりと共に、環境負荷物質の使用を廃止、制限する動きが広がりつつある。鉛もその1つとして候補に上げられ、その使用を制限することが要求されている。しかし、鉛の工業製品における重要性は高く、鋼においてもその被削性、すなわち材料の削られやすさを改善する成分として添加され¹⁾、多くの切削加工によって製造される鋼製品向けに用いられている。

このような鋼中鉛については、EU指令として知られる自動車および電気製品向けの環境規制においても“除外項目”として特例扱いをされているが、日欧においても今後規制が強化されると予測されている²⁾。また自動車、OA機器メーカーなど、大手の需要家でも環境負荷物質を制限することを自主目標に掲げる企業が多くなり、サプライヤーに協力を要請している³⁾。

切削加工は高度に破壊現象をコントロールして、材料の一部を切り屑として除去することにより所定の形状や精度に仕上げる加工方法である。この加工法は製品を高効率かつ高精度に仕上げるのが可能であり、自動車部品やOA機器等の主要な部品製造時に多用されている。このような切削加工が多用される鋼には、鉛を添加することで、高効率高精度の部品製造を可能にし、需要家にとっては低コスト化と部品の高精度化(高機能化)を両立するのに有効であった。そのため、無理な鉛の廃止は切削加工の単なる工具寿命の問題にとどまらず、精度低下による性能低下や仕上げ工程の追加など、性能と能率(コスト)の両面で問題を生じる。新日本製鐵ではそのよ

うな課題に応えるべく低炭非鉛快削鋼を開発し、実用化に成功したので紹介する。

2. 快削鋼における非鉛化の問題点

現在、低炭快削鋼としてJISに規定されている鋼種は硫黄快削鋼SUM 23、硫黄鉛複合快削鋼(いわゆる鉛快削鋼)SUM 24Lなどであり、いずれも多量のSが添加され、鉛快削鋼では硫黄快削鋼にさらに多量のPbが添加されている⁴⁾。これらの低炭快削鋼の代表的な化学成分を表1に示す。

被削性とは、一般に(1)工具寿命、(2)切り屑処理性および、(3)切削精度(寸法、表面粗さ等)に分類され、鋼中鉛はこれらの向上に有効であった。これらの中で工具寿命や切り屑処理性は工具技術の発達により克服されることも多いが、切削精度、特に表面粗さは被削材の材質の影響が大きく、鋼材性能としての被削性向上が不可欠である。表面粗さに劣る場合には、他部品との接合/摺動部としての特性やめつき性など表面処理特性を劣化させるため、部品機能そのものを劣化させることになる。

切削における工具刃先近傍は高温、高応力かつ工具/被削材間の

表1 代表的な低炭快削鋼の化学成分
 Chemical composition of typical low carbon free-cutting steel

Grade	C	Mn	P	S	Pb
SUM 23	0.08	1.1	0.083	0.34	—
SUM 24L	0.08	1.1	0.075	0.32	0.28

*⁽¹⁾ 室蘭技術研究部 主幹研究員 工博
 北海道室蘭市仲町12 〒050-8550 TEL:(0143)47-2301

*⁽²⁾ 室蘭技術研究部 研究員

*⁽³⁾ ニッテツ室蘭エンジニアリング株式会社 課長

激しい凝着現象が特徴である。鋼の切削において、鋼中Pbは切削での高温環境下で工具/被削材間の潤滑と鋼の脆化に対し効果があり、これらの効果によって優れた被削性を得られるとされてきた⁵⁾。当然、SUM 23に鉛を添加したSUM 24Lの方がSUM 23に比べて被削性に優れているため、SUM 23では単純にSUM 24Lの代替はできない。従って低炭快削鋼の非鉛化とは、この鋼中Pbの役割を代替する技術を開発することであり、特に非鉛化によって鉛快削鋼と同等以上の高精度な切削面(表面粗さ)を得ることが重要である。

低炭快削鋼のように比較的軟質な快削鋼の切削では、切削で生じる“構成刃先”と呼ばれる工具への被削材の付着物の影響が大きいことが知られている⁶⁾。すなわち切削中には、構成刃先(Built-up edge: BUE)が工具上に付着し、それを実質的な刃先として切削面を創成するが、構成刃先の付着は不安定なため、成長と脱落を繰り返し、脱落した構成刃先の一部が表面粗さを大きく劣化させる原因となる。従って、この構成刃先成長の抑制が最大の技術課題であった。

3. 構成刃先抑制の考え方

新日本製鐵では開発にあたり、まず鋼切削による表面創成メカニズムの解明に取り組んだ。図1に急速工具抜き取り試験(Quick Stop Test: QST)によって観察された切り屑生成部の断面写真を示す。本試験では切削中に工具を急速に抜き取ることで切削中の切り屑生成挙動を凍結して観察することが可能なため、構成刃先の生成が観察可能である。これによると純鉄のようなフェライト単相では溶着が激しく、延性に富む材料であるにもかかわらず、構成刃先はほとんど生成しない。一方、粗大なMnSやパーライト相を有する硫黄快削鋼では工具寿命には優れるものの、構成刃先は大きく、表面粗さも純鉄に比べ劣る。切削表面の詳細な観察の結果、切削時の破壊はディンプル生成によって生じていることが明らかになってきたことから、MnSやパーライトのような第二相により構成刃先が成長すると考えられた⁷⁾。

図2にMnSと構成刃先生成との関係を模式的に示す。均質体の切削では工具直上で最大応力が生じることから、切り屑分離は工具直上付近で生じる。従来から、MnSは応力集中効果により切削抵抗の低減効果を有することが知られており、MnSのような鋼中の不均質

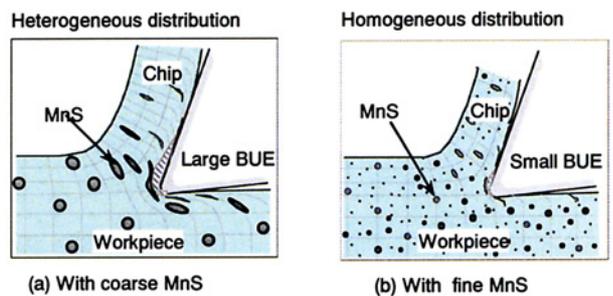


図2 MnSと構成刃先生成との関係
Schematic view about effect of MnS on BUE formation

部が存在する場合には応力集中効果によって不均質部からクラックを生じて切り屑が分離すると考えられている⁸⁾。このことからMnS分布との関係を考えて、図2(a)のように粗大なMnSが存在すると応力集中効果によって工具から離れた位置で切り屑が分離し、切り屑分離点と工具の間に残る被削材は構成刃先として工具直上に残留することになる。そこで、図2(b)のようにMnSが微細かつ均一に分散していると応力集中効果が小さくなるため、切り屑分離点は工具直上に近い位置となり、残留する構成刃先も小さくなると考えられた。

これらの考察結果から、鋼のマイクロ組織を均質化し、工具に近い位置で頻繁にディンプルを生じさせることで構成刃先を抑制できると考えられた。

鉛添加鋼の場合には、鋼中Pbが潤滑効果に加えフェライト相の脆化効果を有するために、構成刃先を頻繁に脱落させてその成長を抑制することにより、表面粗さを劣化させずに良好な被削性を得ることができる。従って非鉛化においてはSを増量するだけでなく、MnSを微細分散させて極力マイクロ組織を均質化することで潤滑効果を維持しつつ、応力集中効果を低減するとともに、構成刃先の頻繁な脱落を促進させることを目指した。

4. 開発鋼の特徴

4.1 開発鋼のマイクロ組織と構成刃先

表2に被削性評価に供した開発鋼及びその比較鋼の硬さを示す。硬さは従来の低炭快削鋼並みであるが、開発鋼ではSを増量するとともに、製造条件を制御することでMnSを非常に微細に分散させた。図3に光学顕微鏡と透過電子顕微鏡で観察されたMnSを示す。開発鋼では光学顕微鏡によって観察されるMnSが従来鋼にくらべて微細な傾向にあるだけでなく、透過型電子顕微鏡のレプリカ法によって観察される微細なMnS数が極めて多く存在する。これにより均質な脆化および潤滑挙動を与えることができ、構成刃先の微小かつ頻繁な脱落を促進し、粗大な構成刃先による表面粗さの劣化を防ぐことが出来ると考えられる。図4に開発鋼、SUM 23、SUM 24Lおよび開発鋼と同一S量で粗大なMnSを有する比較鋼の構成刃先の観察結果を示す。

表2 供試鋼の硬さ
HV hardness of workpieces

Grade	Hardness HV
SUM 23	113
SUM 24L	113
Developed steel	105
Comparative steel with coarse MnS	102

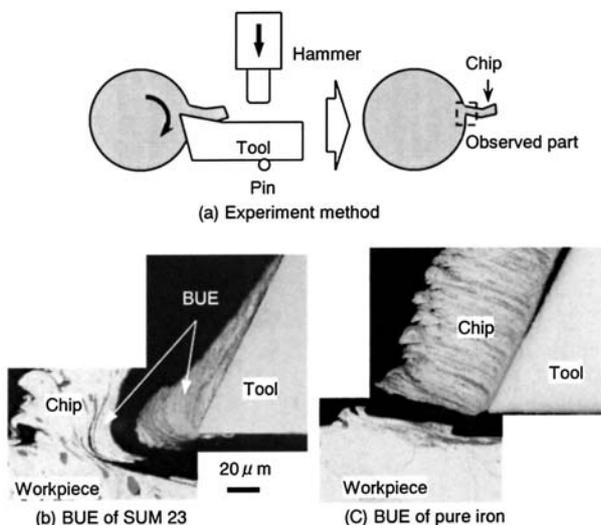


図1 QSTにより観察された切り屑生成部
Cross sectional view of chip formation part by QST

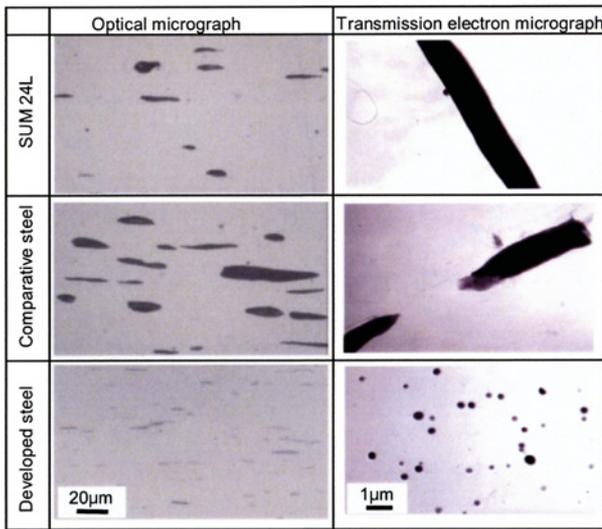


図3 MnS観察
Observation of MnS

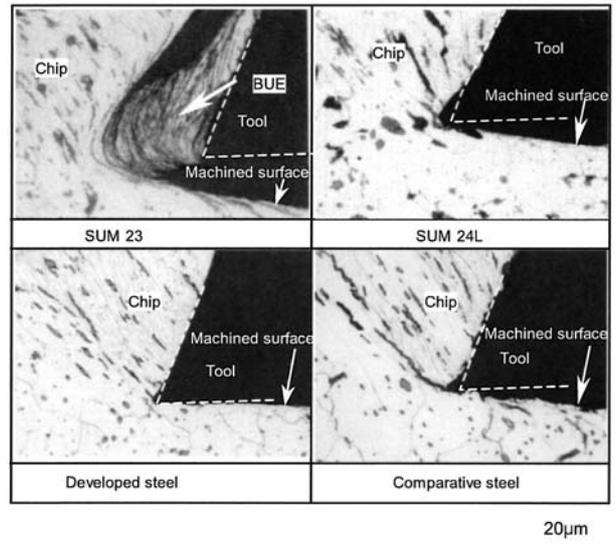
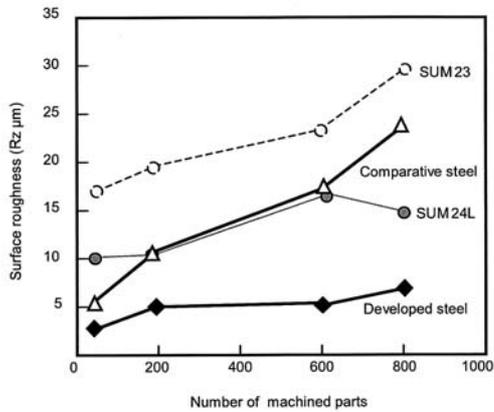


図4 QSTでの切屑生成挙動観察結果
Cross sectional view of chip formation by QST sample

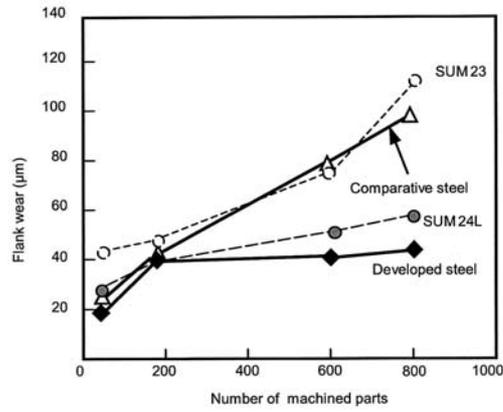
4.2 プランジ切削の被削性

この工業的な実用性を評価するために、実部品を想定した切削試験を行った。具体的には、自動車用油圧部品を模したプランジ切削試験を行い、その切削面の表面粗さと工具摩耗量、構成刃先の付着状況を観察した。図5に(a)切削数と表面粗さ、(b)切削数と工具摩耗量を、(c)工具観察結果を示す。800個以上の加工において、

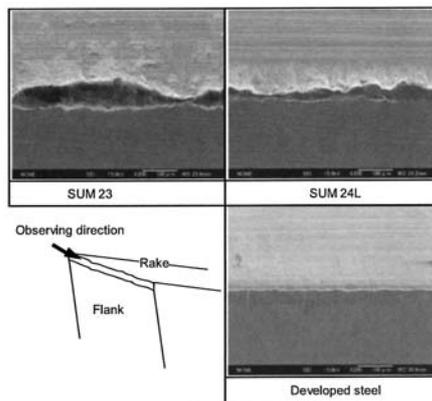
SUM 23より良好な表面粗さと工具摩耗量であることはもちろんのこと、SUM 24L鉛快削鋼と同等以上の被削性を示した。参考ながら開発鋼と同一S量で粗大なMnSしかない比較鋼は、SUM 23よりは良好なもの、SUM 24Lより劣る結果となった。開発鋼は工具観察結果からも工具摩耗が非常に小さく、工具直上に構成刃先の付着がほとんど見られなかった。低炭快削鋼の切削加工においては無人運転



(a) Effect of number of machined parts on surface roughness



(b) Effect of number of machined parts on flank wear



(c) Scanning of micrograph of tool edge after machining 800 parts

図5 仕上面粗さと工具摩耗量に及ぼす切削個数の影響
Effect of number of machined parts on surface roughness and flank wear

が一般的であり、800個の加工にはほぼ半日分の時間を要すると考えられることから、工業上も実用に耐え、開発鋼はSUM 24Lの代替可能なことが確認された。

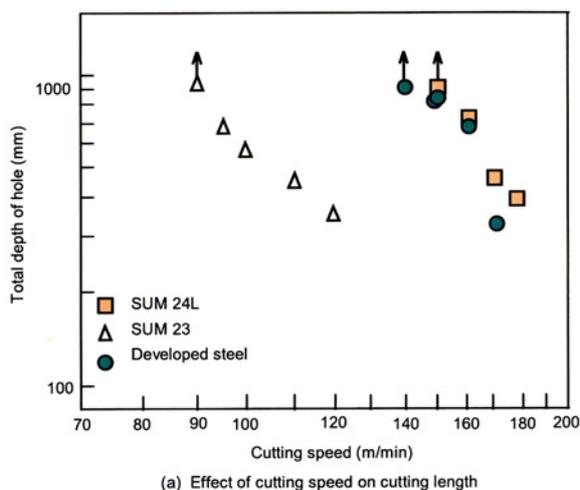
4.3 ドリルによる穿孔性能

図6にドリル最外周速度とドリル寿命までに穿孔された累積穴深さの関係を示す。切削条件は図中に示したとおりであり、通常は切削速度が速くなると穿孔可能な累積穴深さが小さくなる。SUM 23, SUM 24Lおよび開発鋼を比較すると、開発鋼の穿孔可能な穴深さはSUM 24Lと比較すると若干劣るもののほぼ同等といえるレベルであり、SUM 23に比べると大幅に優れている。

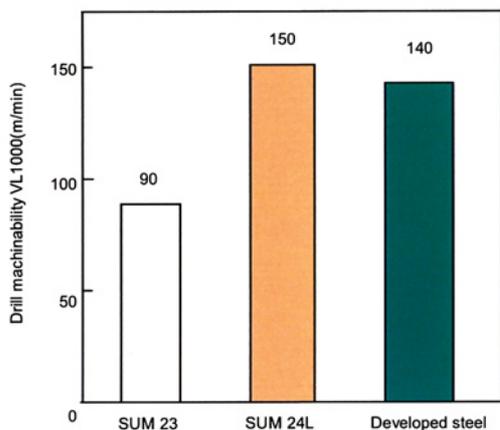
4.4 長手旋削性能

図7(a)に長手旋削における切削時間と工具摩耗量、図7(b)に切削時間と表面粗さの関係を示し、図中に切削条件を示す。この切削方法では高速切削のため、構成刃先はほとんど生成されない。試験の結果、開発鋼の工具摩耗量はSUM 24Lに比べて良好であった。また、切削時間800秒での表面粗さは劣るように見えるものの、これには工具摩耗量が影響していると考えられた。

図8に理想的な切削が成された場合に工具形状と切削条件から幾何学的に計算される表面粗さの式を示す。この式によると、切削面粗さは工具摩耗が進行し、工具ノーズ半径が大きくなるにつれ、表面粗さが小さくなることを示唆しており、図7において切削時間

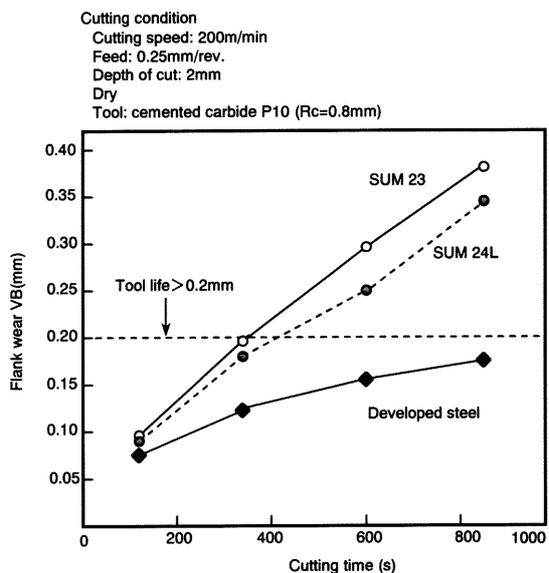


(a) Effect of cutting speed on cutting length

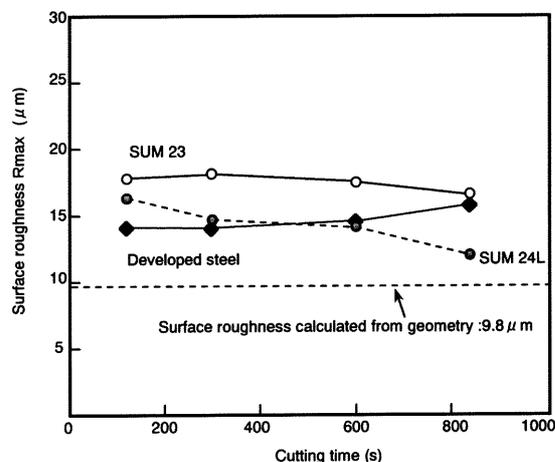


(b) Effect of material on VL1000

図6 ドリル穿孔性能
Drill machinability



(a) Effect of cutting time on flank wear



(b) Effect of cutting time on surface roughness

図7 外周旋削性能
Turning machinability

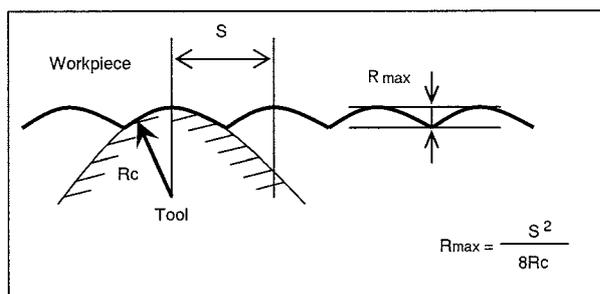


図8 理論粗さ
Surface roughness calculated on geometry

800秒でのSUM 24Lの表面粗さが良好だった理由は工具摩耗が進行してRcが増加したからであり、決して鋼の被削性を反映したものではないと考えられた。この点については図9を参照されたい。図9にSUM 23, SUM 24Lおよび開発鋼の切削表面、工具摩耗、切屑を示す。切削面は送りマークが観察されたが、送りマーク間の切削面にもしれが観察された。このむしれの量は開発鋼が最も少なく、次いでSUM 24L, SUM 23の順であった。また、工具摩耗量も開発鋼が最も少なく、切り屑も開発鋼とSUM 24Lではほぼ同様な形状であ

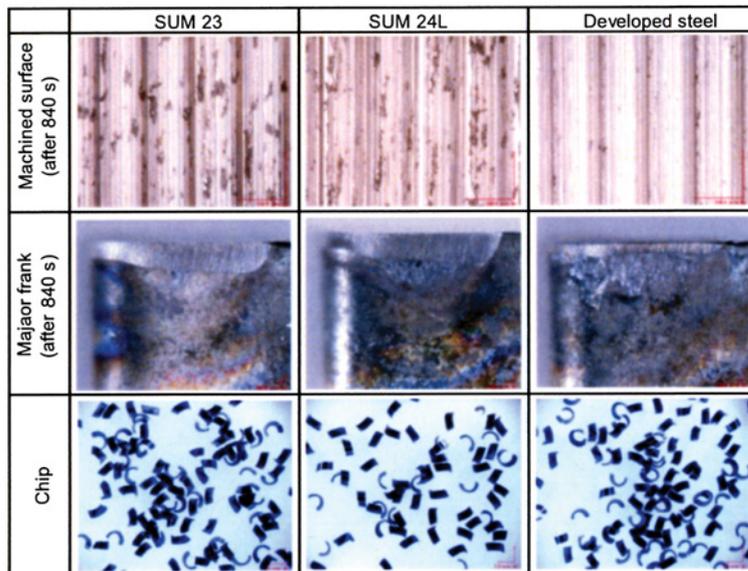


図9 切削後の表面, 工具摩耗および切屑の観察
Optical micrograph of machined surface, tool wear, and chip

り, 実用上問題ないと考えられた。このように切削状態としては開発鋼が3鋼種の中で最も優れていた。

開発鋼は室蘭製鐵所の転炉で溶製され, 棒鋼, 線材圧延を経て製造されている。低炭快削鋼は一般には伸線メーカーを経て自動車関連およびOA, 家電関連分野で使用されており, 特にそのオイルシール部や軸受け取り付け部, 他部品とのはめ合いが重視される小物部品に多用され, その適用部品は多岐にわたる。本開発鋼も同様のルートで需要家に供給され, これまでのところ伸線性, めっき性など, 被削性以外の各種特性も従来鋼と同等以上であり, SUM 24Lの代替可能との評価を得ている。

5. まとめ

環境負荷物質削減を指向して鉛を添加していた快削鋼を非鉛化した低炭非鉛快削鋼の開発について報告した。今後, 鋼中鉛に関する規制は世界各国でも整備されることが予想され, ますます強化され

ると共に範囲も広がると考えられる。低炭快削鋼は身近にある工業製品に多用されてきたため, 今後より一層, 環境にやさしい快削鋼が重要となる。新日本製鐵は鋼中鉛の削減に正面から取り組んできた。その集大成である本開発鋼は環境にやさしく, 需要家でのコスト削減にも協力できるため今後さらに普及するものと確信する。

参考文献

- 1) 木村:第96, 97回西山記念技術講座. 日本鉄鋼協会編, 1984, p.140
- 2) 浅川:自動車技術. 57(11), 13(2003)
- 3) 例えば“Hondaグリーン購買ガイドライン”. 本田技研工業(株)購買本部編, 2001
- 4) JIS G 4804-1999
- 5) Warket, W.R. et al.: Journal of the Iron and Steel Institute. (October), 779(1971)
- 6) 片山:機械技術. 45(1), 106(1997)
- 7) 橋村, 宮西, 水野:CAMP-ISIJ. 18(3), 569(2005)
- 8) 岩田, 上田, 柴坂:精密機械. 43(3), 311(1977)