



入門講座

鉄鋼の日本工業規格— 11

介在物制御の革新：快削鋼 (SUM)

Innovation of Inclusion Control in Free-cutting Steel

白神哲夫

Tetsuo Shiraga

元JFE条鋼(株)

1 はじめに

鋼材は最終部品形状になるまでにほとんどの場合、加工(熱間、冷間)や熱処理などを付与される。その中の一つに切削加工がある。「切削」とは、JIS B 0106:1996「工作機械— 部品及び工作方法— 用語」によると「切削工具と工作物とを相対運動させて削ること」となっている。今、仮に「工具」として、ナイフ、「工作物」として、りんごを取り上げてみる。りんごをナイフで半分に「切る」とりんごの皮をナイフで「剥く(削る)」動作が考えられるが、後者が「切削」に相当する。すなわち、刃物(工具)を用いて、被削材の不要部分を切くずとして分離し、残った部分を機械部品などとして利用する加工を「切削」という¹⁾。

ここで、切削加工を行なうに際して、能率向上やコストダウンが求められる場合に、被削材(削られるもの、工作物)が削られやすいことが求められることもある。削られやすい鋼材を快削鋼と呼び、削られやすさを「被削性」と呼ぶ。しかし、往々にして、言いやすいため「切削性」と呼ぶことがあるが、筆者も若かった頃に切削の大家から、間違いであることを指摘された記憶が未だに頭の片隅にある。

ところで、鋼材の被削性向上には鋼中の異物である介在物を活用することが昔から知られている。介在物の種類はもとより、サイズ、形状、分布などの影響もあり、単純に決まった成分を溶製すればいいとは限らず、製鋼面や圧延面での課題も多いため、JIS規格になりにくい面もある。また、被削性はお客様の切削方法(切削装置、工具材種、工具形状、切削条件など)によって、評価が異なる場合もあり、その対応が難しいところもある。

本稿では快削鋼の規格とそれに関連した内容、快削鋼の基礎として被削性に及ぼす冶金因子の影響について説明し、さらには近年開発が進んだ非鉛快削鋼についても紹介をする。

2 快削鋼の規格

規格の話に行く前に、快削鋼とはどんな鋼種かの概説が必要である。前述したように各種の快削元素を添加したものが快削鋼となる。快削元素として、S(主に硫化物として存在)、Pb(主に単体として存在)、Ca(主に酸化物や硫化物として存在)が代表的なもので、S系統でSe、Teがあり、Pb系統でBiがある。Caとは全く同じではないが、Mg、Tiが同様のものとして挙げられる。その他ではBN、黒鉛なども使われている。これらの詳細は西山記念技術講座の第96・97回「快削鋼の製造技術の発展と品質の向上」²⁾、第182・183回「介在物制御と高 cleanliness 鋼製造技術」(快削鋼の介在物制御と最近の切削技術の動向)³⁾、第188・189回「特殊鋼棒線の最近の進歩」(快削鋼の最近の進歩とそれを支える切削現象理解)⁴⁾を中心に参考にしていただきたい。

快削鋼のJIS規格といえば、JIS G 4804(2008)「硫黄及び硫黄複合快削鋼鋼材」(化学成分を表1に示す)であり、詳細は後述するが、ここではS=0.08~0.35mass% (以下、%で表示)、Pb=0.10~0.35%の範囲内での規定である。現実にはそれ以下のSやPbの添加鋼もあるし、その他の元素を添加したものもある。これらの一部は自動車技術会規格JASO

表1 JIS G4804(2008) 硫黄及び硫黄複合快削鋼の化学成分規格(mass%)

種類の記号	C	Mn	P	S	Pb
SUM21	0.13以下	0.70~1.00	0.07~0.12	0.16~0.23	—
SUM22	0.13以下	0.70~1.00	0.07~0.12	0.24~0.33	—
SUM22L	0.13以下	0.70~1.00	0.07~0.12	0.24~0.33	0.10~0.35
SUM23	0.09以下	0.75~1.05	0.04~0.09	0.26~0.35	—
SUM23L	0.09以下	0.75~1.05	0.04~0.09	0.26~0.35	0.10~0.35
SUM24L	0.15以下	0.85~1.15	0.04~0.09	0.26~0.35	0.10~0.35
SUM25	0.15以下	0.90~1.40	0.07~0.12	0.30~0.40	—
SUM31	0.14~0.20	1.00~1.30	0.04以下	0.08~0.13	—
SUM31L	0.14~0.20	1.00~1.30	0.04以下	0.08~0.13	0.10~0.35
SUM32	0.12~0.20	0.60~1.10	0.04以下	0.10~0.20	—
SUM41	0.32~0.39	1.35~1.65	0.04以下	0.08~0.13	—
SUM42	0.37~0.45	1.35~1.65	0.04以下	0.08~0.13	—
SUM43	0.40~0.48	1.35~1.65	0.04以下	0.24~0.33	—

M106：08「自動車構造用鋼鋼材」に「被削性改善に対する成分の追加又は変更」として規定されている。快削鋼の規格で忘れてはいけないうのがAISI（アメリカ鉄鋼協会）規格やSAE（自動車技術者協会・アメリカ）規格である（JIS規格との対応を表2に示す）。国内ではこの規格に基づいて製造・販売しているものが多くある。また、本稿では割愛するが、ステンレス鋼ではJIS G4303「ステンレス鋼棒」やG4308「ステンレス鋼線材」に、高SやSe、Cu、Pb添加が規定されている。

JIS G 4804（2008）「硫黄及び硫黄複合快削鋼鋼材」の化学成分をみると、SUM21～25まではC≤0.15%で高S（0.16～0.40%）以外にP=0.04～0.12%添加されており、一部ではさらにPb=0.10～0.35%添加された7鋼種ある。いずれの元素も鋼材の他の分野からみると想定以上の添加に驚く方もいるかと思われる。SやPbは快削元素として認識されているため、その添加量が多いことは被削性向上で想定内だが、Pの多量添加は低炭素鋼でフェライトが多いためにフェライトを脆化させ、被削性向上を狙ったものである。また、化学成分内には規定されていないが、Al、Siレスで、かつ酸素は鋼材の中で最大の含有量（100ppm以上）となっている。これらはすべて被削性向上のための施策である。結果として、これらの鋼種は快削鋼の中でも最高の被削性を示すものとなっている。

SUM31～43はC=0.14～0.48%の範囲内の6鋼種である。S=0.08～0.33%、Pb=0.10～0.35%で、Pが0.040%以下と低いのは高炭素鋼となり、フェライトが少ないためであり、基本的には機械構造用炭素鋼のS15C～S48C相当鋼の快削化を図ったものとなっている。機械構造用炭素鋼では機械的性質も参考値ながら示されているため、それらに影響を及ぼすSやPを前半の快削鋼（SUM21～25）に比べると低減している。

JASO M106：08「自動車構造用鋼鋼材」ではJISで規定していないSやPbの少量添加（快削鋼としての位置づけではなく、快削元素添加鋼の位置づけ）とCa添加を規定して、実用上の便宜を図っている（表3に示す）。L1（Pb=0.04～0.09%）、L2（Pb=0.10～0.30%）、S0（S=0.015～0.035%）、

S1（S=0.04～0.07%）、S2（S=0.08～0.12%）、U（Ca=0.0005～0.0080%）の6鋼種が規定されている。機械構造用炭素鋼を中心とした構造用鋼は、一般的にはS≤0.035%で規定されているので、S0はJISの範囲内であるが、その上限を狙ったものとなる。すなわち、JIS鋼種として扱いが可能となるメリットがある。Ca添加鋼はJISには規定されていないが、Ca脱酸調整快削鋼という名称で、比較的新しく、1960年代から70年代に広く研究され、開発されたためと製鋼面で連続铸造となったことで、Ca含有量の制御が厳しくなったためと思われる。

3 被削性に及ぼす冶金因子

一般的には、被削性の評価方法には工具寿命、切削抵抗、仕上げ面粗さ、切くず処理性の4種類が挙げられる。これらの評価方法での優劣がすべて同じなら、一つの評価方法を用いれば済むわけであるが、必ずしもそうではないことが多く、難しいところである。また、一つの評価方法でも優劣が異なる場合も出てくる⁵⁾。したがって、被削性に及ぼす冶金因子の影響についても一つの例と考えていただいた方がいい。

冶金因子としては介在物、化学成分（介在物としての元素は除く）、機械的性質（強度・硬さ・延性）、ミクロ組織（熱処理を含む）、冷間加工などが挙げられる。

3.1 介在物

3.1.1 硫化物

MnSのような硫化物は切削時に切欠きとして作用し、応力集中作用で切くず分離を容易にする。S量の多いSUM系の快削鋼では比較的小物部品での切削が多く、低切削速度のため、被削性の評価として仕上げ面粗さが用いられる。仕上げ面粗さには切削時に工具面上に付着する構成刃先の影響が大きく、これを小型・安定化する必要がある。そのためにはMnやSの増加により、MnSの増量やサイズアップが有効であり⁶⁾（図1）、また、サイズだけでなく、MnSの形状としてのアスペクト比（介

表2 快削鋼JISと外国規格の比較

JIS	ISO	AISI SAE
SUM21	9S20	1212
SUM22	11SMn28	1213
SUM22L	11SMnPb28	12L13
SUM23	—	1215
SUM23L	—	—
SUM24L	11SMnPb28	12L14
SUM25	12SMn35	—
SUM31	—	1117
SUM31L	—	—
SUM32	—	—
SUM41	—	1137
SUM42	—	1141
SUM43	44SMn28	1144

表3 JASO M106 被削性改善鋼に対する成分の追加または変更
（単位：mass%）

付加記号	Mn				S	Pb	Ca
	基本鋼のMn規格下限 が0.40%未満のもの 下限	基本鋼のMn規格下限 が0.40%以上のもの 上限	基本鋼のMn規格下限 が0.40%未満のもの 下限	基本鋼のMn規格下限 が0.40%以上のもの 上限			
…L1	—	—	—	—	—	0.04～ 0.09	—
…L2	—	—	—	—	—	0.10～ 0.30	—
…S0	—	—	—	—	0.015～ 0.035	—	—
…S1	+0.20	+0.30	+0.10	+0.20	0.04～ 0.07	—	—
…S2	+0.30	+0.40	+0.20	+0.30	0.08～ 0.12	—	—
…U	—	—	—	—	—	—	0.0005～ 0.008

在物の幅／長さ)も影響が大きい⁷⁾(図2)。形状制御には製鋼面では酸素量の制御が有効で100ppm程度で仕上げ面粗さが最小となる⁸⁾。また、圧延面でも最適な圧延条件が存在する。これは硫化物の形状だけでなく、マイクロ組織の変化による降伏比の変化が効いている⁹⁾。

一方で、S量の少ないSC系の快削鋼でも同様の結果が得られているが、硫化物の形態制御にはCaやMgが活用されている¹⁰⁾(図3)。ただ、試験条件によってはサイズの影響は小さい場合¹¹⁾と大きい場合^{12,13)}が出てくる。

3.1.2 Pb

Pbは鋼中には単体か、MnSに付着した形で存在する。その融点が327℃のため、切削時にPbが溶融し、溶融金属脆化

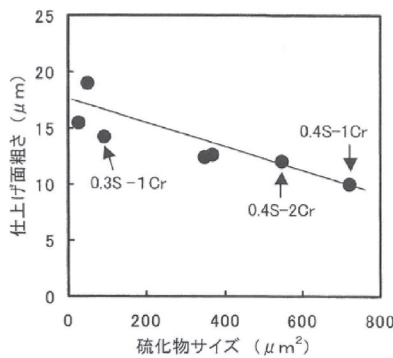


図1 硫化物系介在物の大きさと仕上げ面粗さの関係⁶⁾

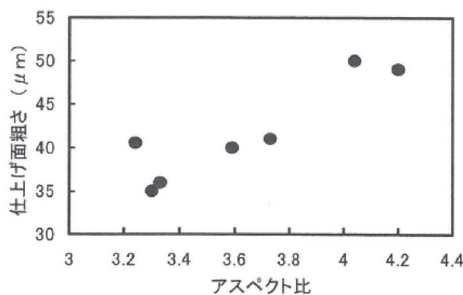


図2 MnSアスペクト比の仕上げ面粗さに及ぼす影響⁷⁾

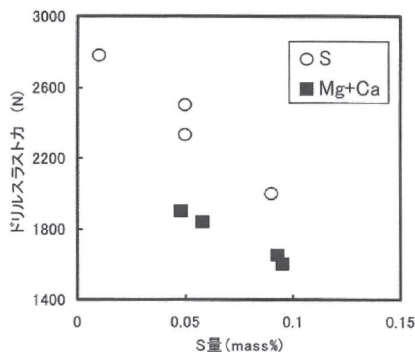


図3 ドリルスラスト低減に及ぼすMg+Ca添加の効果¹⁰⁾

作用で、切屑が分断されやすくなるとともに、工具と切屑や被削材との間の潤滑作用で、工具摩耗を抑制する¹⁴⁾(図4)。

Pbのこのような特性のために、とくに切くず処理性が優れており、自動車生産の自動化の流れの中でPb快削鋼・Pb添加鋼の生産要望が強まり、現在に至ったわけである。環境面の課題は当然あるが、製鋼上も鋼とPbの融点や比重の差が大きいためにPbの均一分散に工夫を要する。図5に各種炭素鋼のPb添加有無での超硬工具寿命を示す¹⁵⁾。すべての鋼種でPb添加の効果があるが、低炭素鋼ほどその度合いが大きい。

3.1.3 Ca酸化物

Caは鋼中に酸化物や硫化物として存在する。酸化物の場合、超硬での高速切削時に工具面上にベラークと呼ばれる付着物が生成し、工具摩耗を抑制する¹⁶⁾(図6)。製鋼時の脱酸のためにCaを含む脱酸剤(Ca-Siなど)を用いることで、所望の酸化物を生成させる工程をとるので、製造時の課題でもある。一方で、硫化物の場合はCa添加による硫化物の形態制御を通しての被削性向上に使用される例が増えている¹⁷⁾。

3.2 化学成分、マイクロ組織、強度、冷間加工

化学成分の影響とは言っても、マイクロ組織や機械的性質が変化するためなど、相互に影響を及ぼすものも多い。

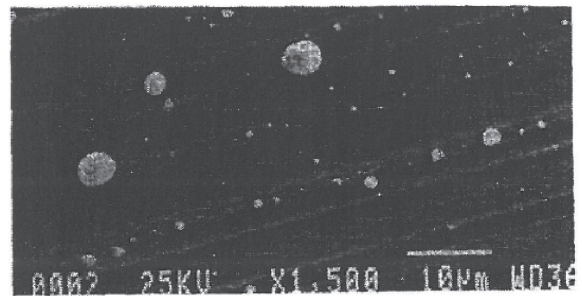


図4 切削時の切くず裏面(工具との接触面)におけるPbの溶融凝固した状態¹⁴⁾

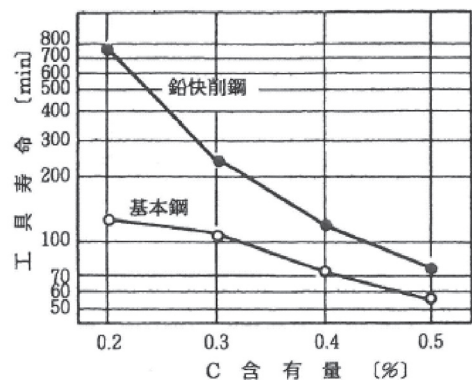


図5 Pb快削鋼のC量と工具寿命の関係¹⁵⁾

化学成分のうち、介在物としての元素は除くと、C、Si、Mn、P、Cu、Ni、Cr、Mo、Nなどが挙げられる。Cは増加すると、パーライト量が増大するので、強度が増大し、工具寿命としては劣化する。しかし、減少すると純鉄に近づくわけで、非常に軟質になり、かえって、切削抵抗が増大し、工具寿命が劣化し、構成刃先も生成しやすくなり、仕上げ面粗さも劣化する。したがって、0.2%程度のC量で被削性が最良となるとも言われている¹⁸⁾。

Si、Pなどは固溶強化元素であるが、ベース鋼が何かによって被削性への影響度合いは異なる。中高炭素鋼ではこれらの元素が増加するほど強度が増大するので、やはり、被削性は劣化する傾向にある。しかし、低炭素鋼では元々軟質なために、これらの元素が添加されると、かえって被削性が向上することとなる。

これは硬さの面からも言える。図7にはマイクロ組織が変化することで硬さが変化し、被削性が変化することが示されている¹⁹⁾。被削性の最良のところは硬さ90HRB付近であり、これは180HVに当り、機械構造用炭素鋼 (SC) の焼ならし材でいうとS20C～S30Cに相当する。結果的には硬さの影響が大きいようにも見える。しかし、図7にはマイクロ組織の影響が述べられているものの、同時に硬さも変化しているので、どちらが大きく寄与しているかは判断できない。

そこで、精密工学会切削加工専門委員会では一つの鋼種 (SCM440) で硬さが同一になるように熱処理を行い (焼入焼戻し、焼ならし、球状化焼ならし・引拔)、マイクロ組織が異な

るものを作成し、切削試験を行った²⁰⁾。各種切削試験を行ったが、被削性は概ね、球状化焼ならし・引拔>焼ならし=焼入焼戻しの順になった。

また、SCM420でフェライト・パーライトとフェライト・ベイナイトでの比較を行うと、図8に示すようにベイナイト含有の方が被削性が良好となった²¹⁾。近年では同じ鋼種でフェライト・パーライトの組織ながら、粒径を変化させ (結果的にはフェライト分率やフェライトサイズを変化)、被削性の比較を行った例も見られる^{22,23)}。図9に一例を示す²³⁾。粒径の大きい方が被削性が良好となる。

冷間加工すると加工硬化するため、延性も低下し、せん断による切くず生成時のせん断角が大きくなり、切くずが薄くなるため、被削性が有利になる点と加工硬化による硬さ増大

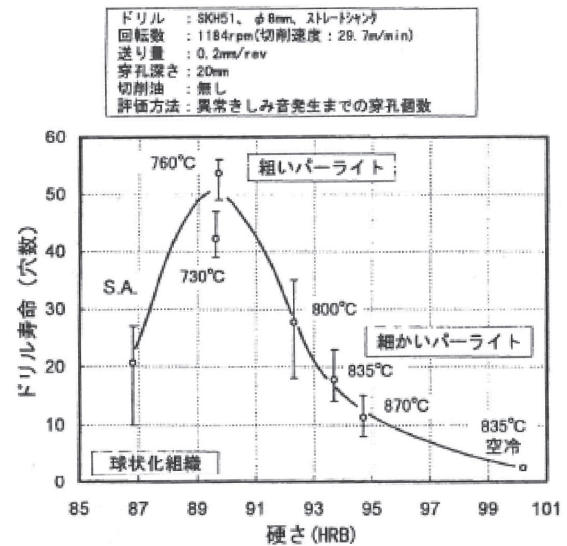


図7 ドリル穴あけ性に及ぼす硬さ・マイクロ組織の影響¹⁹⁾

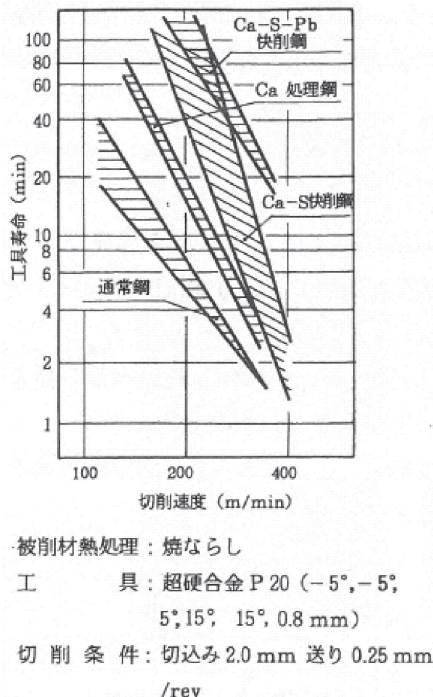


図6 Ca快削鋼の超硬工具寿命¹⁶⁾

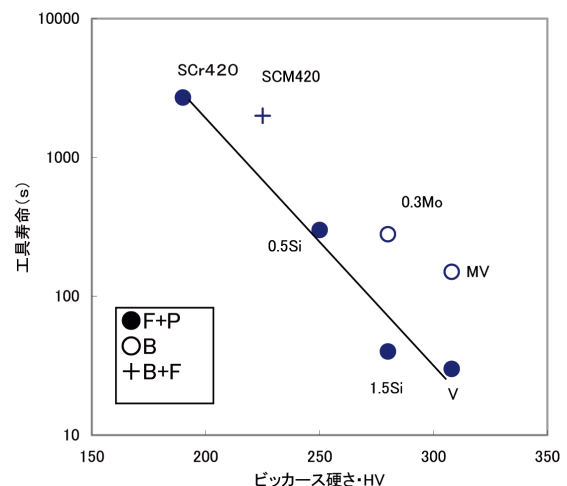


図8 超硬工具寿命に及ぼす被削材の硬さ・マイクロ組織の影響²¹⁾

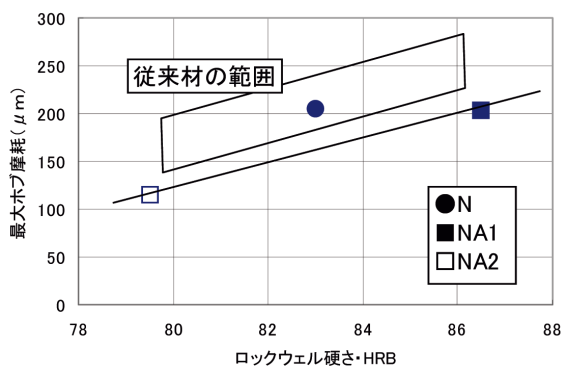


図9 ホブ切り時の工具摩耗と被削材硬さの関係²³⁾
(硬さ：N(細粒) = 88.0HRB、NA1(粗粒) = 86.6HRB、NA2(粗粒) = 79.5HRB)

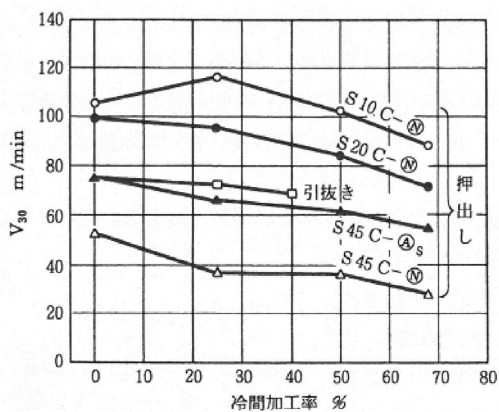


図10 炭素鋼のハイス工具寿命に及ぼす冷間加工の影響²⁴⁾

により、せん断応力が增大するため、被削性に不利な点が共存する。したがって、図10に示すように低炭素鋼では被削性(ここでは工具寿命)の最適な加工率が存在する一方で、中炭素鋼では硬さ増大の影響が大きく、冷間加工するほど被削性が劣化する²⁴⁾。

4 非鉛快削鋼の動向

近年の地球環境問題の点から、有害物質規制が行われ、Pbについても欧州ELV指令(2003年7月)やRoHS指令(2006年7月)により規制されることとなった。ただ、現段階ではPb快削鋼のPb含有量の最大値である0.35%までは適用除外とされている。2016年の改正を前に適用除外の延長申請がなされたところである。

このような状況下で非鉛快削鋼の開発が行われてきたが、詳細はふえらむに記載の「非鉛快削鋼に関する開発動向と快削化の今後」²⁵⁾を参照願いたい。低炭素硫黄複合快削鋼対応の非鉛快削鋼の開発成分の一覧表を表4に示す²⁵⁾。3.1.1で

表4 低炭素硫黄複合快削鋼対応の非鉛快削鋼の例²⁵⁾(mass%)

C	Si	Mn	P	S	特殊元素	その他
—	—	—	—	増量	Nb微量添加	—
0.01~0.25	≤0.05	0.50~1.50	0.010~0.05	0.20~0.45	Sn 0.040~0.08	—
0.07	≤0.01	1.53	0.05	0.46	—	—
0.05	tr	0.58	0.076	0.385	Cr 1.0	—
0.07	—	1.44	0.082	0.42	—	—
—	—	—	—	増量	—	製鋼条件
—	—	—	—	>0.4	—	製鋼条件

表5 機械構造用鋼対応の非鉛快削鋼の種類²⁵⁾

介在物系統	非鉛化の考え方(介在物)	特徴
硫化物	CaS, Ca-Mg-S	介在物二重構造(酸化物+硫化物)による形態制御、機械的性質異方性小
	TiCS	構成刃先保護により工具寿命向上。ドリル加工での効果
	微細分散(Nb添加ほか)	微細分散。機械的性質異方性小
Bi	Bi	Pbの半分の含有量で効果有
黒鉛	黒鉛	冷間鍛造性も効果あり。
	BN	工具面上にAIN付着により、工具寿命向上。高速切削での効果大。

示した考え方で基本的にはS増加し、追加項目として各鉄鋼メーカー独自のノウハウが入っている。一方、機械構造用鋼対応の非鉛快削鋼は表5に示すような硫化物系、Bi、黒鉛系の3系統に分かれる²⁵⁾。硫化物系はS増量で硫化物量を増やし、CaやMg添加により、硫化物形態制御を行い、機械的性質の異方性を減少させている。Biは周期律表でPbの隣であり、従来から同等の特性を示すことが述べられていた。Pbのような有害性がないことが浮上したきっかけである。黒鉛系は黒鉛とBNが同類ではあるが、黒鉛はSiを1%近く添加することと黒鉛化熱処理が必要であるのに対して、BNはその制約はないものの、鋼中でのN含有量に限界があるため、介在物としてのBN量はMnSなどに比べて少ない。構造用鋼系の非鉛快削鋼はどうしても各部品対応での開発となり、進展が遅いのが課題である。

5 おわりに

鋼材の高強度化が進むにつれて、被削性改善が求められるのは当然としても、純鉄系の軟質な鋼材も切削抵抗が高いなどの問題もあり、被削性改善の要望も出てくる。また、切削レスで冷間鍛造ままでの使用が増える傾向にあるが、ここでも若干の切削加工が必要となり、検討の余地もある。このような様々な分野での被削性改善が必要となるが、その際に被削性を単なる特性評価として扱うと新たな発展につなぐににくい。切削現象は奥が深いこともあり、やはり、じっくりと

腰を据えて、開発を進める必要も出てくる。

過去の制御圧延の発展の際に圧延は単なる形状制御の手法であったものが、材質制御の手法に変わり、厚板・薄板の世界では制御圧延は現在では当たり前の技術として扱われている。切削（快削鋼）の世界でも切削が単なる形状制御のためだけなら、発展はないと思われる。しかし、とはいっても、形状ではそれまで航空機用で限定されていた5軸制御のような切削装置が自動車用などでも用いられ、複雑かつ高精度の加工が可能となりつつある。快削鋼においても今後は単なる快削化というよりは、切削による材質制御（加工の特性上、表面の材質制御となるが）を考慮した検討も必要となろう。その場合に、新たな介在物制御やマイクロ組織制御が出てくることを期待したい。

参考文献

- 1) 山根八洲男：特殊鋼，63（2014），2.
- 2) 第96・97回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，（1984）
- 3) 岡田康孝：第182・183回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，（2004），181.
- 4) 家口浩：第188・189回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，（2007），189.
- 5) 古澤貞良：第96・97回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，（1984），23.
- 6) 村上俊之，富田邦和，白神哲夫：JFE技報，23（2009），17.
- 7) 家口浩：神戸製鋼技報，54（2004）3，11.
- 8) 服部篤，狩野隆，羽生田智紀：電気製鋼，75（2004）1，35.
- 9) 白神哲夫：CAMP-ISIJ，12（1999），961.
- 10) 家口浩，土田武広，新堂陽介，坂本浩一，染川雅美，鹿磯正人：神戸製鋼技報，52（2002）3，62.
- 11) 宮西慶，橋村雅之，水野淳：CAMP-ISIJ，18（2005），617.
- 12) 常陰憲正，藤松威史，平岡和彦：山陽特殊製鋼技報，10（2003）1，35.
- 13) 速石正和，狩野隆，紅林豊：電気製鋼，73（2002）1，5.
- 14) 白神哲夫，石崎哲行，田川寿俊：鉄と鋼，73（1987），S1224.
- 15) 木村篤良：第96・97回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，（1984），129.
- 16) 大野鐵：第96・97回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，（1984），157.
- 17) 狩野隆，次井慶介，中村貞行：電気製鋼，71（2000），89.ほか
- 18) D.W.Murphy：Iron Steel Eng.,44（1967）4,123.
- 19) 小林一博：熱処理，41（2001）4，196.
- 20) 精密工学会切削加工専門委員会：被削性ワーキンググループ研究報告，（2005）
- 21) 大森靖浩，星野俊幸，天野虎一：CAMP-ISIJ，11（1998），552.
- 22) 間曾利治，久保田学，宮西慶：CAMP-ISIJ，25（2012），357.
- 23) 針谷誠，松村康志：CAMP-ISIJ，25（2012），363.
- 24) 山口喜弘，下畑隆司，喜多壮大：神戸製鋼技報，3（1974），16.
- 25) 白神哲夫：ふえらむ，15（2010），497.

（2015年10月16日受付）