



特殊鋼棒線の最近の進歩-4

非鉛快削鋼に関する開発動向と快削化の今後

Progress in Development of Lead-Free Free-Cutting Steel and Future of Free-Cutting Technology

白神哲夫
Tetsuo Shiraga

JFE 条鋼 (株) 仙台製造所
研究主監

1 はじめに

自動車や各種機械の部品の製造では最終的に切削加工を施されることが多い。切削加工時の削りやすさは鋼材から見た場合、被削性(削られやすさ)として評価される。被削性は切削方法、切削工具、切削条件などの因子でも変化しますが、鋼材側の因子も大きい。とくに自動車産業の成長と相まって、高生産性(切削加工の高能率化)を目指して鉛快削鋼が使われてきた¹⁾が、地球環境問題から非鉛化の要望が強まってきた。単に鉛添加を他の元素などで置換して、被削性を同等以上にするだけでなく、近年は鋼材の高強度化も進み、鋼材自身が難削化していることや切削速度の高速化や切削工具の高性能化などの様々な因子が関与しており、それに耐えうる非鉛快削鋼が必要にもなって来ている。

2 快削鋼の位置づけ

快削鋼はS、Pb、Caを添加したS快削鋼、Pb快削鋼、Ca快削鋼が主体であるが、S快削鋼と同一系統でTe、Se、Pb快削鋼と同一系統でBiなどがある。表1に快削鋼の区分を快削元素の含有量で分けたものを示す。直近のデータはないが(また、あったとしても非鉛化が進んで変化している可能性がある)、近年、快削鋼は国内では年間約100万トン生産されて

いる。そのうちの約70%が鉛快削鋼(少量添加も含む)である。

各種快削鋼(S、Ca、Pb)の被削性の比較は各種条件下で調べられているが、一般的なものを表2に示す。鉛は鉄との固溶がほとんどないため、鋼中では金属鉛の形で存在する。応力集中源としての作用は元より、327℃と低融点であるため、潤滑、溶融金属脆化などの作用により、工具寿命や切り屑処理性に効果が大きい。表2から分かるように鉛快削鋼は全般的に被削性が良好であるが、とくに切り屑処理性が良好なのが特徴である。自動車産業の成長に伴い、各種工程の自動化が進み、当然、切削工程もNC旋盤やマシニングセンターなどによって、自動化されてきたが、自動化で最もネックになっていたのが切り屑処理性であった。せっかく装置を入れて自動化しても、切り屑が工具や製品に絡まり、人手をかけることが出てきたため、切り屑処理性の良好な鉛快削鋼が広まった。

しかしながら、ここに来て、欧州ELV指令(2003年7月)による自動車関連での鉛使用の禁止やRoHS指令(2006年7月)による電子・電気機器での鉛使用抑制などが規制として行われた。ただ、現段階では鉛快削鋼の鉛含有量最大値の0.35mass%までは対象外とされているものの、これらを目標に非鉛快削鋼の開発が進んできた。

表1 快削鋼の区分

鋼種	SC, SCM等(低S系)	AISI12L14等(高S系)
S快削鋼	S0	<0.035%
	S1	0.04~0.07
	S2	0.08~0.12
Pb快削鋼	(L0)	(0.02~0.03)
	L1	0.04~0.09
	L2	0.10~0.30
Ca快削鋼	0.001~0.010	—

表2 各種快削鋼の被削性比較

介在物	S (MnS: 硫化物) Ca (酸化物) Pb	工具寿命			切り屑 処理性	仕上げ面 粗さ
		旋削		穴あけ		
		超硬	ハイス	ハイス		
	○	△	○	○	○	
	◎	×	×	×	×	
	×~△	○	◎	◎	◎	

3 非鉛快削鋼の開発動向

3.1 快削鋼の研究動向

図1に1990年からの日本鉄鋼協会講演大会での快削鋼関係の発表件数の推移を示す。約10年前までは快削鋼に関する研究も少なかったが、1999年からは増加傾向にある。これは地球環境問題から、鉛快削鋼の使用に制限が加えられることとなり、ユーザーからの要望もあり、鉄鋼メーカー各社が非鉛快削鋼の開発（機械技術特集²⁾、精密工学会切削加工専門委員会シンポジウム^{3,4)}など）に力を入れたからと思われる。詳細は後述するが、各社の技報でも1999年頃から開発の記載が認められる。

日本鉄鋼協会の西山記念技術講座においても、岡田と家口が2004年⁵⁾と2007年⁶⁾にそれぞれ快削鋼関連の報告で非鉛快削鋼を含めた詳細なレビューを行っている。一方、「ふえらむ」においても2007年特集「鉄鋼材料で進む鉛フリー化」が掲載されている⁷⁾。

本稿ではこれらの情報を主体に、非鉛快削鋼に関する開発動向とともに鋼材の快削化の今後の動向を探る。鉛快削鋼は既に表1に示したように大きく2種類に分類できる。ひとつは、AISI 12L14 (JIS SUM24L) に代表される、低炭素系で被削性を第一義とするいわゆる低炭素硫黄複合快削鋼である。いまひとつは被削性と同時に冷間鍛造性や機械構造用鋼としての特性の両立を要求される機械構造用鉛快削鋼である。以下ではこれら二つのタイプの鉛快削鋼に対応する非鉛快削鋼の開発動向を紹介する。

3.2 低炭素硫黄複合快削鋼対応の非鉛快削鋼

12L14やSUM24Lはシャフト類での使用が多い快削鋼であるが、快削化を追求した結果、鋼材として他に類を見ない特徴が多いので、改めて示す。①フェライト脆化 (P≒0.07mass%)、②Sは鋼材の中で含有量最大 (約0.3mass%)、③Pbは鋼材の中で含有量最大 (約0.3mass%)、④硬質酸化物レス (Al、Si含有量ほぼゼロ)、⑤酸素は鋼材の中で含有量最大 (100ppm以上)

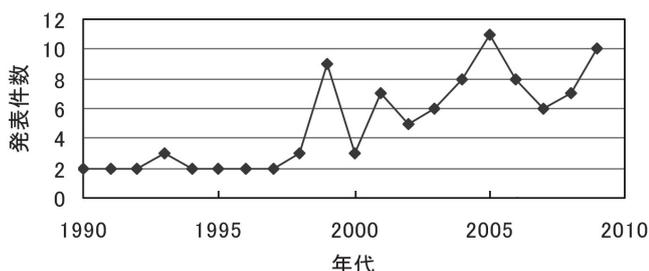


図1 日本鉄鋼協会講演大会での快削鋼関連の発表件数推移

このような特徴があるが、とくに鋼中酸素量が100ppm以上と桁違いに多いことと、快削元素であるSやPbの添加量が多いことなどのため、機械構造用鋼で既に使用されているCaや他の元素も使いにくく、長く、非鉛化は考えられてこなかった。しかし、ここ10年精力的な開発が行われ、2003年の特殊鋼特集⁸⁻¹⁰⁾にて報告されて以来、日本鉄鋼協会講演大会での発表以外に、各社の技報などに報告されている¹¹⁻¹⁶⁾。主な成分が公表されている順に表3にまとめた。

基本的には0.3S+0.3PbのPbを削除し、Sの増加+αでPbレスを補っている。考え方は二つあり、一つは硫化物の大型化・紡錘化であり、もう一つは逆の硫化物微細分散である。この鋼種は比較的の小物部品での切削が多く、切削速度が低速で、被削性の評価として仕上げ面粗さが用いられることが多い。仕上げ面粗さには構成刃先の影響が大きく、構成刃先を小型化・安定化するためには硫化物を大型化・紡錘化するのがいいということで、Mn、Sの増量によって、被削性向上を目指している (図2)^{12-15,17-20)}。家口は仕上げ面粗さに及ぼすMnS形態の影響を調べ、サイズやアスペクト比の影響が大きいことを明らかにした (図3)¹⁷⁾が、硫化物の形態制御はCr、V、Nbなどでは効果なく、これらの添加なしのほうが良好であ

表3 低炭素硫黄複合快削鋼対応の非鉛快削鋼の例 (一印は成分等不明: mass%)

C	Si	Mn	P	S	特殊元素	その他	文献例
—	—	—	—	増量	Nb 微量添加	—	1 0)
0.01/0.25	≦0.05	0.50/1.50	0.01/0.05	0.20/0.45	Sn 0.04/0.08	—	1 6)
0.07	<0.01	1.53	0.05	0.46	—	—	1 4)
0.05	tr	0.58	0.076	0.385	Cr 1.0	—	1 5)
0.07	—	1.44	0.082	0.42	—	—	1 2)
—	—	—	—	増量	—	製鋼条件	1 3)
—	—	—	—	>0.4	—	製鋼条件	1 1)

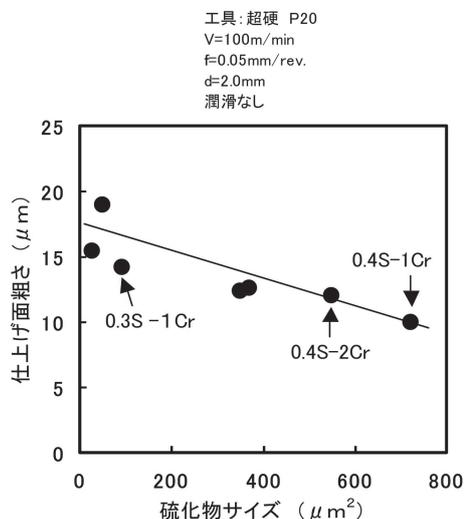


図2 硫化物系介在物の大きさと仕上げ面粗さの関係

る¹²⁾。AlやTiによる脱酸の影響も調べられ、O=100ppm程度で最良の特性を示す(図4)が、Al,Ti (Tiを0.08mass%まで添加)脱酸も有効ではないことが示された¹⁴⁾。ただ、Tiを多量に添加(0.13mass%)すると工具面上にTiNが付着し、工具摩耗を抑制することも示された²¹⁾。一方で、計算状態図を活用し、S増量+Cr添加によって初めて硫化物晶出温度域の増大することを見出し、結果として硫化物の大型化を達成し、12L14よりも被削性の向上したのも見出されている^{15,20)}。

硫化物微細分散については、「仕上げ面粗さには構成刃先の影響が大きく、構成刃先を小型化・安定化する」思想は硫化物の大型化・紡錘化と同じであるが、「構成刃先を小型化・安定化する」にはマイクロ組織の均一化(MnSの微細分散)が有効であるとしている(図5)¹¹⁾。硫化物の微細分散の手法は製鋼条件の制御^{11,22)}とNb微量添加によるもの¹⁰⁾がある。

これらとは全く異なった手法もある。米国のDeArdoらはPb快削鋼の被削性とPbの関係を解析し、Pbが粒界に偏析することが影響しているとし、同様な挙動を示すSnに着目し、Snを0.04~0.08mass%含有させた12L14代替鋼を開発した¹⁶⁾。

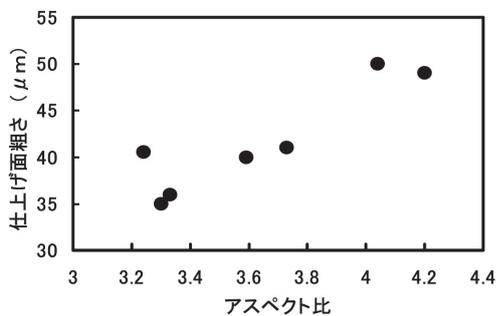


図3 MnSアスペクト比の仕上げ面粗さに及ぼす影響

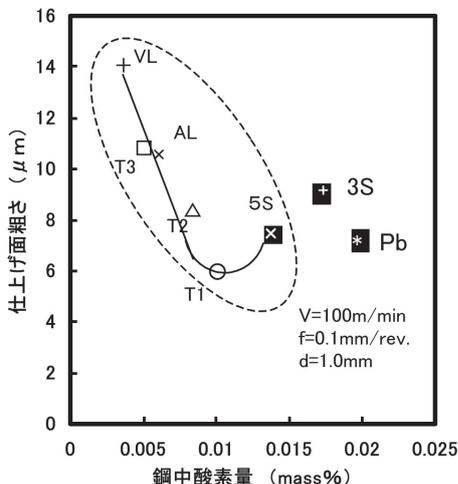


図4 鋼中酸素量と仕上げ面粗さの関係

3.3 機械構造用鉛快削鋼対応の非鉛快削鋼

表4に今までに報告された機械構造用鋼系の非鉛快削鋼の種類を示す。硫化物系、Bi、黒鉛系の大きく三つに区分される。硫化物系はCa脱酸快削鋼の改良型と言える。S増量で硫化物量を増大させるとともに、硫化物形態制御を主とし、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は述べられていた。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。しかし、コスト、資源量などでの課題が指摘されている。黒鉛系は黒鉛とBNは同類ではあるが、多少別に記すべきところがある。黒鉛を鋼中に生成させるにはSiを1%近く添加することが必要であり、基本成分から異なってくる。冷間鍛造性も被削性も良好ではあるが、一般的には黒鉛化熱処理が必須である。BNの場合、鋼中でのN量に限界があるため、BN介在物量がMnSなどに比べて少ない。以下に介在物の区分毎に詳細に記す。

CaやCa-Mg添加による硫化物や酸化物の形態制御を行い、被削性向上を図っている(図6)²³⁻²⁸⁾。超硬の摩耗は酸化物や硫化物の工具面上への付着により、抑制されている。一方、ドリル寿命はMnSの形態(サイズ、アスペクト比など)の影響が大きいが、試験条件によってはサイズの影響は小さい場合²⁹⁾と大きい場合^{23,26)}が出てくる。MnSサイズ、形状、組成など影響因子が多いが、サイズが大きくなって、寿命向

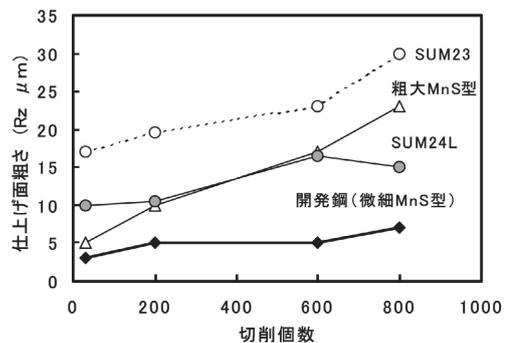


図5 切削個数による仕上げ面粗さの変化

表4 機械構造用鋼系の非鉛快削鋼の種類

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寿命向上。ドリル加工での効果大。
	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あり。
黒鉛	黒鉛	冷間鍛造性も効果あり。
	BN	工具面上にAlN付着により工具寿命向上。高速切削での効果大。

上するのは切り屑せん断域の硫化物と母相の界面に生成する微小ボイドの生成によるものと考えられている²⁶⁾。高速切削での超硬摩耗抑制や低速でのドリル寿命向上も良好であることから、硫化物の球状化や酸化物が硫化物中に含まれて無害化されることも一因とされている²⁸⁾。これらも切削試験条件、鋼材の製造条件等よく比較し、何が被削性に効いているのか検討を行う必要がある³⁰⁾。

被削性以外の特性に対しては従来の倍程度のS量でも形態制御によって、靱性の異方性が同等であることも示されている(図7)²³⁾。また、かち割りコンロッド用で限定ではあるが、硫化物形態と衝撃特性(破壊時の寸法変化)に相関があり、アスペクト比を小さくする(紡錘型)ことにより、被削性も向上するが、かち割り性や高強度化も達成している³¹⁾。

一方で、Sを0.1mass%以上添加し、硫化物の微細分散を図ることによって、被削性向上はもちろん、疲労特性の異方性もないものが示されている(図8)³²⁾。この微細分散の手法として、Nb添加することが有効でもある³³⁾。

黒鉛を含有する鋳鉄の被削性がいいことから、鋼中に黒鉛を分散した快削鋼について、古くから研究されてきた³⁴⁾。近

年ではドリル寿命で見ると、12L14よりも良好であり、冷間鍛造性と高周波焼入れ性も良好なものが開発されている³⁵⁾。また、黒鉛化熱処理時間の短縮化を図るため、セメンタイトの安定化と黒鉛核生成サイトの増大を検討し、新しいタイプの黒鉛快削鋼も開発された。高い疲労強度と優れた被削性が得られている^{19,36)}。

BNは黒鉛と同様の形態を示すことから、快削化への適用が古くから検討されてきた³⁷⁻³⁹⁾が、実用化に至っていなかった。一般的なボロン添加鋼(焼入性向上目的)のように焼入性が向上しないような手段が必要であった。村上らはその点を検討し、50ppm以上のBと100ppm以上のNを添加し、N/Bを制御することにより焼入れ性を変化させず(図9)、MnSと同程度のサイズの六方晶BN介在物を生成させ、被削性の向上したものを開発している(図10)⁴⁰⁻⁴²⁾。超硬での高速切削時にAINが工具面上に付着し、摩耗抑制するという新しいメカニズムも解明されている⁴³⁾。SUS系への適用の検討も行われている⁷⁾。

Biは従来からPbと同系統のものとして認識されているが、有毒性は指摘されておらず、Pbよりも微量で被削性への効果

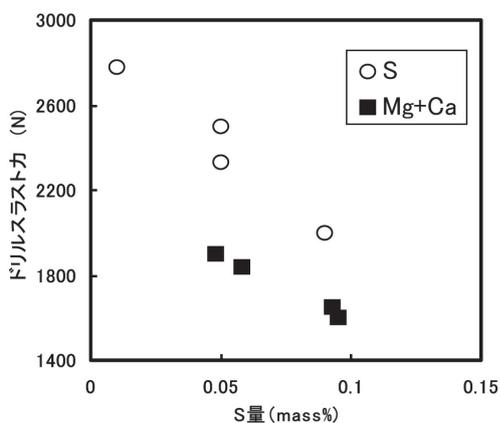


図6 ドリルスラスト力低減に及ぼすMg + Ca添加の効果

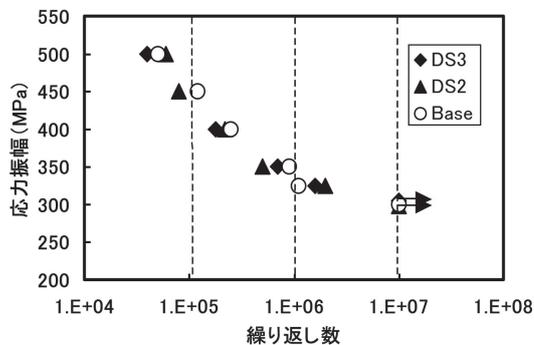


図8 鍛造方向に対し45°方向の試験片による疲労特性

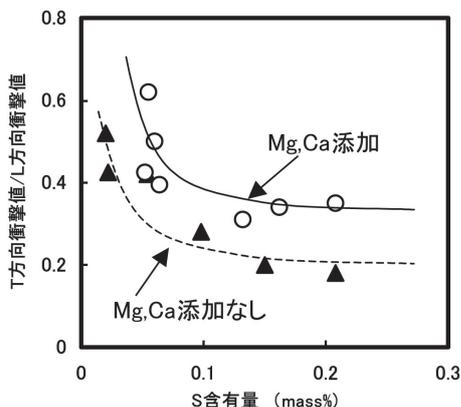


図7 S量と靱性異方性の関係とMg + Ca添加効果

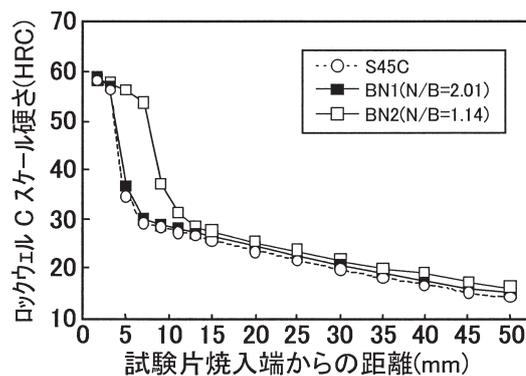


図9 BN添加時の焼入れ性

があるため、最近でも活用が行われている^{44,45)}。ただ、資源量の点、コスト面で厳しい状況である。

また、Tiを0.15mass%以上添加することにより、Ti炭硫化物を生成させ、被削性が向上している(図11)⁴⁶⁾。高硬度の構成刃先が生成し、刃先を保護することにより、被削性が向上するとしている。また、微量に析出するTiCの析出強化によって、疲労強度も向上する。Ti炭窒化物は電磁ステンレス鋼などにも活用されている⁴⁷⁾。

機械構造用鋼系では個別の部品毎の対応になりがちである。上記の場合もクランクシャフト^{32,46)}、ギア²⁴⁾、コンロッド³¹⁾と部品対応となっている。他の部品へ適用する場合、強度も異なることがあり同時に、切削条件(切削装置、切削工具、いわゆる切削条件など)も異なる場合が多く、非鉛快削鋼といえども、S量や特殊添加元素を最適化する必要も出てくる。快削鋼の難しい点である。

4 鋼材の快削化の今後の動向

前章では非鉛化を介在物の観点から整理した。介在物以外、とくにマイクロ組織の観点での研究例を示すとともに、快

削鋼に関する今後の動向を考えてみた。

12L14系では高Sのため、硫化物の形態制御による被削性の変化が大きいのと思われ、硫化物の形態制御による被削性の改善が多く、マイクロ組織の影響を見たものはほとんどない。1215、12L14を用いて、圧延温度・仕上げ温度の異なる材料で被削性の評価がなされている。仕上げ温度が上昇すればマイクロ組織は大きくなるが、ここではマイクロ組織を降伏比で評価し、仕上げ面粗さと降伏比に相関が認められている⁴⁸⁾。機械構造用鋼では熱間鍛造後、恒温焼ならしを行うことによって、やや粗めのフェライト・パーライト組織が得られ、被削性が向上することも認められ、粗いパーライトによる切欠き効果と延性低下が一因としている(図12)⁴⁹⁾。このような圧延技術や熱処理技術の活用も非鉛化の一助となる可能性もある。

これらに対して、最近では切削現象を工具と被削材の界面でのトライボロジーと見ての解析が必要との観点が指摘されている^{30,50)}。一つは切削温度を考慮することであり、もう一つは工具・被削材間での反応による工具面上への付着物の活用である。一口に被削性といってもとくに切削速度の異なるものはメカニズムが異なるため、同一には扱えないということもある。また、工具面上への付着物に関しては、従来のCa快削鋼における酸化物系付着物のベラーク以来、硫化物、窒化物(AIN、VN、TiNなど)の付着も観察されている⁶⁾。このような工具と被削材の界面現象を検討することにより、新しい快削鋼の発見につながるとも言える⁵¹⁾。

また、切削された製品側から見た場合、仕上げ面粗さの観点は既に述べたが、仕上げ面のマイクロ組織の観点すなわち、製品の特長(例えば、疲労特長など)から見ると、切削現象

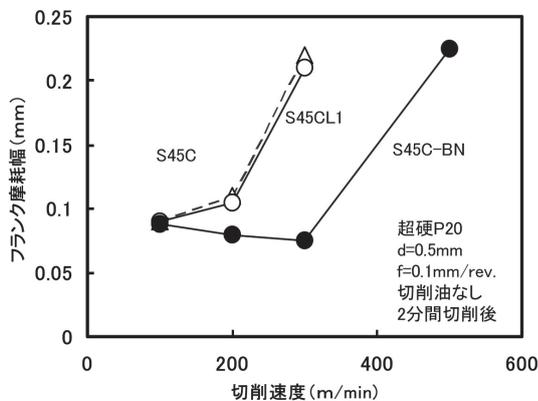


図10 超硬での摩耗に及ぼすBNの影響

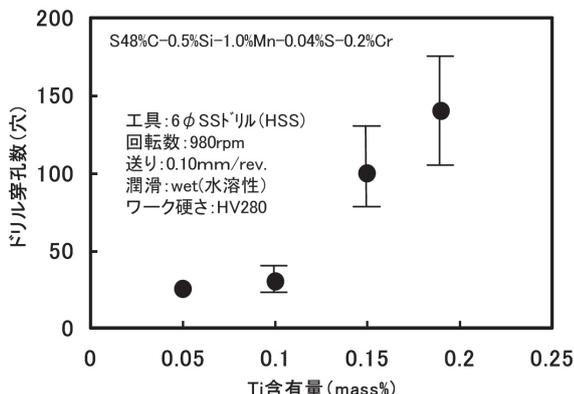


図11 ドリル穿孔寿命に及ぼすTiの影響

ドリル: SKH51、φ8mm、ストレートシャンク
 回転数: 1184rpm(29.7m/min)
 送り量: 0.2mm/rev.
 穿孔深さ: 20mm
 切削油: なし
 評価方法: 異常さしみ音発生までの穿孔個数

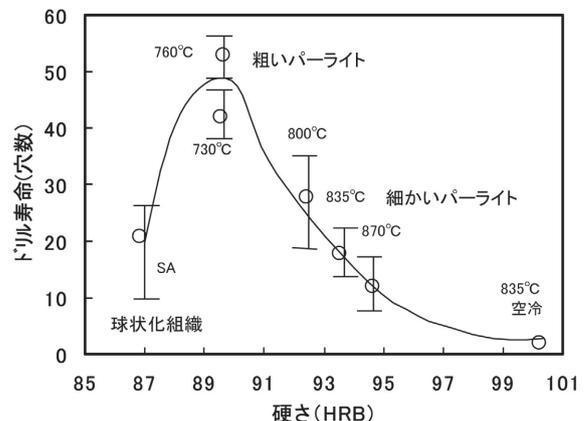


図12 ドリル穿孔性に及ぼすマイクロ組織の影響

を活用することができるのではとの見方もある。昨年、日本鉄鋼協会の秋の講演大会で、シンポジウム「切削加工による強加工を受けた表面・界面現象」が行われた⁵²⁾が、切削によって、表面のマイクロ組織の微細化やナノ組織化などが報告され、切削を単なる加工と見るのではなく、特性付与の一工程と見ることによって、新しい分野(仕上げ面のマイクロ組織制御のための快削鋼など)も生まれる可能性を示している。

切削加工そのものから見た場合、環境の観点では切削液の使用抑制でミスト噴霧を主体とするMQL (minimum quantity lubrication) やドライ加工も拡大しつつあり、また、切削速度の高速化も求められており、それに対応した快削鋼も必要になってくると思われる。

5 おわりに

非鉛快削鋼の開発動向と鋼材の快削化の今後をまとめた。非鉛快削鋼の場合に限らず、新規に鋼材開発を行うと必ず被削性の検討が必要となってくることは鋼材メーカーの研究者は当然ながら、顧客における開発担当者、生産(とくに、切削加工)技術者の方々も十分に認識されていることである。しかしながら、往々にして、再度仕切りなおしということがあり得る。また、上記したように、マイクロ組織や仕上げ面状況を考え、切削加工を扱うことも新たな観点ということでは興味がわくところである。ただ、切削加工をよく見ると、普段のちょっとしたところにヒントがあるのでと常に感じる。全く同じ材料を提供しているにもかかわらず、被削性が悪いということがある。被削性が悪いならば、その原因を追究し、逆を考えれば、被削性が向上するはずである。開発の種は現場にあるとも言われている。今後も鋼材の快削化(「被削性」向上)を目指して、その一助となれば、幸である。

参考文献

- 1) 木村篤良：第96・97回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(1984)，140.
- 2) 機械技術・特集「鉛フリー快削材とその加工」，48 (2000) 6.
- 3) 精密工学会切削加工専門委員会シンポジウム「鉛フリー快削材料の現状と課題」，(2003)
- 4) 精密工学会切削加工専門委員会成果報告書「環境対応切削加工システムの確立に向けて」，(2005)
- 5) 岡田康孝：第182・183回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(2004)，181.
- 6) 家口浩：第188・189回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会，(2007)，189.
- 7) 杉山香里：ふえらむ，12 (2007) 6, 340.
- 8) 村上俊之：特殊鋼，52 (2003) 1, 22.
- 9) 水野淳：特殊鋼，52 (2003) 1, 29.
- 10) 福住達夫：特殊鋼，52 (2003) 1, 45.
- 11) 橋村雅之，宮西慶，水野淳：新日鉄技報，386 (2007)，42.
- 12) 坂本浩一，家口浩，杉村朋子，阿南吾郎，吉田敦彦，辻武司：神戸製鋼技報，56 (2006) 3, 35.
- 13) 長谷川達也，渡部了：特殊鋼，56 (2007) 1, 56.
- 14) 服部篤，狩野隆，羽生田智紀：電気製鋼，75 (2004) 1, 35.
- 15) 村上俊之，白神哲夫，三瓶哲也，及川勝成，石田清仁：まてりあ，43 (2004)，136.
- 16) C.I.Garcia, M.J.Hua, M.k.Miller and A.J.DeArdo：ISIJ Int., 43 (2003)，2023.
- 17) 家口浩：神戸製鋼技報，54 (2004) 3, 11.
- 18) 長谷川達也，松井直樹：特殊鋼，57 (2008) 3, 33.
- 19) 岩本隆，村上俊之：JFE技報，4 (2004)，64.
- 20) 村上俊之，富田邦和，白神哲夫：JFE技報，23 (2009)，17.
- 21) 松井直樹，荒井正浩，長谷川達也：CAMP-ISIJ，18 (2005)，571.
- 22) 橋村雅之，宮本健一郎，広角太朗，宮西慶：まてりあ，46 (2007)，105.
- 23) 常陰典正，藤松威史，平岡和彦：山陽特殊製鋼技報，10 (2003) 1, 35.
- 24) 藤松威史，常陰典正，平岡和彦：山陽特殊製鋼技報，11 (2004) 1, 50.
- 25) 狩野隆，次井慶介，中村貞行：電気製鋼，71 (2000) 1, 89.
- 26) 速石正和，狩野隆，紅林豊：電気製鋼，73 (2002) 1, 5.
- 27) 狩野隆，羽生田智紀：電気製鋼，75 (2004) 1, 27.
- 28) 家口浩，土田武広，新堂陽介，坂本浩一，染川雅実，鹿磯正人：神戸製鋼技報，52 (2002) 3, 62.
- 29) 宮西慶，橋村雅之，水野淳：CAMP-ISIJ，18 (2005)，617.
- 30) 家口浩：ふえらむ，11 (2006) 12, 820.
- 31) 阿南吾郎，辻武司，吉田敦彦，椎橋慶太：神戸製鋼技報，56 (2006) 3, 44.
- 32) 橋村雅之，平田浩，蟹沢秀雄，内藤賢一郎：新日鉄技報，378 (2003)，68.
- 33) 福住達夫：特殊鋼，52 (2003) 1, 46.
- 34) 横川孝男，赤澤正久，赤瀬繁之，黒岩和也：鉄と鋼，63 (1977)，484.
- 35) 小此木真，橋村雅之，蟹沢秀雄，片山昌：新日鉄技報，370 (1999)，17.

- 36) 岩本隆, 星野俊幸, 松崎明博, 天野虔一, 川縁正信: まてりあ, 42 (2003), 163.
- 37) 羽生田智紀, 中村貞行: CAMP-ISIJ, 2 (1989), 1854.
- 38) 片山昌, 浅野巖之, 橋村雅之: CAMP-ISIJ, 5 (1992), 847.
- 39) 家口浩: CAMP-ISIJ, 7 (1994), 770.
- 40) 村上俊之, 白神哲夫: NKK 技報, 178 (2002), 1.
- 41) 村上俊之, 白神哲夫, 山根八洲男: まてりあ, 45 (2006), 144.
- 42) 村上俊之, 冨田邦和, 白神哲夫: JFE 技報, 23 (2009), 10.
- 43) 山根八洲男, 田中隆太郎, 関谷克彦, 鳴瀧則彦, 白神哲夫: 精密工学会誌, 66 (2000), 229.
- 44) 岩間直樹: 機械技術, 48 (2000), 637.
- 45) 染川雅実, 鹿磯正人, 松島義武, 家口浩: 神戸製鋼技報, 51 (2001), 13.
- 46) 渡里宏二, 垣見治則, 松本斉: まてりあ, 41 (2002), 57.
- 47) 佐藤武信: 特殊鋼, 56 (2007) 1, 62.
- 48) 白神哲夫: CAMP-ISIJ, 12 (1999), 961.
- 49) 小林一博: 熱処理, 41 (2001) 4, 196.
- 50) 岡田康孝: 熱処理, 41 (2001) 4, 183.
- 51) 白神哲夫: 30周年記念シンポジウム, 精密工学会切削加工専門委員会編, (2005), 18.
- 52) 切削フォーラムシンポジウム, 日本鉄鋼協会編, (2009)

(2010年5月6日受付)