

PbフリーMg-Ca-S快削鋼の開発

常陰 典正*1・藤松 威史*1・平岡 和彦*2

Development of unleaded magnesium-calcium-sulfur free cutting steel
Norimasa Tsunekage, Takeshi Fujimatsu and Kazuhiko Hiraoka

Synopsis: Unleaded magnesium(Mg)-calcium(Ca)-sulfur(S) free-cutting steel whose sulfide shape was controlled by both Mg and Ca addition was developed. This paper shows how Mg-Ca-S free-cutting steel came about and the various properties compared with leaded(Pb) free-cutting steels. The composition of sulfides in this steel is (Mn, Mg, Ca)S with MgO-Al₂O₃ as nucleus. The impact anisotropy of the steel with 0.1 mass% S is better than ordinary S free-cutting steel (same content of S, JASO-S2) with MnS. Further, the H. S. S. drill life, carbide tool wear resistance, and chip breakability of Mg-Ca-S free-cutting steel are equal to or even better than those of Pb free-cutting steel (0.17 mass% Pb, JASO-L2). It is found that the H. S. S. drilling property has large improving effect when it is cut at relatively high cutting velocity. Further, the carbide tool wear is suppressed because the tool surface is covered with (Mn, Mg, Ca)S.

Therefore, the Mg-Ca-S free-cutting steel has a possibility of a substitute for Pb free-cutting steel.

Keywords: free-cutting steel; magnesium; calcium; sulfur; lead; sulfide; drill life; tool wear; chip breakability; machinability; impact anisotropy;

1. 緒言

近年、世界的な環境問題への関心の高まりに伴って、環境負荷物質であるPb使用量削減の動きが活発化している。鉄鋼業界における主対象は自動車部品等に用いられるPb快削鋼であるが、現時点では法的規制は無く、EUのELV (End of Life Vehicles) においても0.35mass%以下のPbを含有する鋼材は例外的に規制対象外としている¹⁾。しかし、数年毎の見直し時にこの例外措置が解除される可能性があるため、Pb快削鋼の製造メーカーや需要家は早急にPbフリー化に対応できる新たな快削技術を確立しておく必要がある。

このような状況の下、当社でもPbフリー快削鋼化の課題に取り組むこととし、1996年から愛知製鋼株式会社および株式会社豊田中央研究所と共同研究を開始した。本報では、Pbフリー快削鋼開発の経緯、ならびに開発した硫化物形態制御型Mg-Ca-S快削鋼^{2,3)}の紹介を行う。

2. Pb代替快削性物質の検討

従来から報告されている快削性物質の特徴をTable 1にまとめる。快削性物質を被削性改善機構で大きく分類する

と、Pbに代表される低融点物質による溶融脆化型^{4,6)}、硫化物に代表される応力集中型⁷⁻⁹⁾、Ca系酸化物に代表される工具表面保護型^{10,11)}、Pに代表されるマトリックスおよび結晶粒界脆化型¹²⁾、の4タイプとなる。中でも応力集中型には様々な快削性物質が報告されており、特に硫化物系の欠点を形態制御によって改善するタイプのものが代表的である。黒鉛に類似した六方晶BN^{13,14)}析出タイプでは、切削時の応力集中作用以外に層間剥離潤滑作用や工具刃先に生成するAIN膜が摩耗を抑制する被削性改善機構も報告されている^{15,16)}。

Pb代替快削性物質の条件としては、Pbの特徴である「常温での機械的性質への悪影響が小さくハイスドリル寿命や切屑処理性に優れること」がポイントとなるが、その他に環境負荷性、コスト、原料調達性、安定製造性への考慮も要求される。また、個々の部品毎にPbフリー化を検討する場合には、鋼材の基本化学成分を大幅に変更したり、新たな熱処理を付与してミクロ組織を適正化することも可能であるが、汎用的なPbフリー快削鋼として利用するためには、Pbから他の快削性物質への置換のみで対応できることが望ましい。もちろん、それぞれの快削性物質により被削性改善機構が異なれば、最適な切削条件(切削速度、送り等)が存在するはずで、ある程度の模索が必要であろう。

*1 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ

*2 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ長

Table 1. Examples of free-cutting additives and their characteristics.

	Low melting point type	Sulfide type	Shape controlled sulfide type	Graphite type	Oxides with low melting point	Brittle matrix type
Typical additives	Pb, Bi	MnS	Ca, Zr, Ti, Se, Te	Graphite, h-BN	CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	P, Sn
Mechanisms of improving machinability	• Brittleness by melting metal • Lubricant	• Stress concentration • Lubricant	(similar to sulfide type) • Shape and dispersion control	• Stress concentration • Lubrication	• Protective coating on tool surface	• Brittleness of matrix
Machinability	Especially, excellent H. S. drill life and chip breakability	Good machinability in various cutting conditions	Equal to or better than sulfide type	Good machinability in various cutting conditions	Especially, excellent carbide tool life	Good machinability in various cutting conditions
Mechanical property	Equal to the base steel at room temp.	Large mechanical anisotropy	Improvement of anisotropy	• Deterioration of strength (graphite) • Change of hardenability (h-BN)	Equal to base steel	• Deterioration of ductility
Note	High cost and difficulty of supply with raw material (Bi)	Low cost and easy to industrial use	Toxicity and high cost (some elements)	• Necessity of heat treatment to graphitize (graphite) • Restriction on BN content (h-BN)	Ordinary, it is used with Pb and S.	Difficulty to recycle

被削性改善機構の面からPb代替快削性物質を検討する場合、当然Pbと同様の低融点物質系が有望と考えられる。そこで、a) 低融点物質であること、b) 明らかな有毒物質ではないこと、c) Feへの固溶度がほとんどないことを条件に、文献調査によってスクリーニングし、残った元素や化合物について可能な限り鋼中への添加実験を行ったところ、鋼中に均一微細分散させることが可能な物質はBiのみであった。そこで、共同研究メンバーの岩間ら¹⁷⁾がBi添加鋼の機械的性質や被削性を詳細に検討した結果、Pb単独の代替には約1/4～1/5のBi量、S-Ca-Pb複合の場合には約1/2のBi量でPbフリー化できることが明らかになった。なお、BiはPbと物理的および化学的性質が類似しているため、Pb同様に毒性が疑われる。共同研究では、Biの毒性に関する調査も行っているが、Biが明らかに有害であるという事実は掴めず、またBi化合物を薬として服用するという事例¹⁸⁾もあることから、環境負荷の観点からは使用可能と考えられる。ただし、BiにはTable1 note欄に示したように、コストや原料調達点ではクリアすべき課題がある。

一方、代表的な硫化物系介在物であるMnSは安価で工業的にも利用し易いため、従来からPbと同様に快削性物質として多く利用されている。MnSは低温から高温まで比較的安定して鋼中に存在し、どのような温度域でもMnSが応力集中源として働くため、広範な切削条件で被削性改善効果を示す。しかしながら、さらなる被削性の向上を図ってMnSを大量に含有させた場合、機械的性質への悪影響が増大する。特に、MnSは熱間圧延や鍛造時に延伸するため、衝撃特性の異方性を増大させることが大きな問題となる。したがって、硫化物系を利用する場合、熱間加工における硫化物の延伸を抑制すること、すなわち硫化物形態制御によって機械的性質の低下を抑制し、S含有量で被削性を調整することが開発基本方針となる。硫化物形態制御(分散制御も含めて)によって機械的性質の改善のみならず、被削性をも改善できればS含有量抑制が可能となる。

そこで、共同研究では硫化物形態制御型快削鋼の開発にも着手した。硫化物形態制御の手段としては硫化物の晶出核となる酸化物を利用する方法と、硫化物自体の組成を変化させる方法が挙げられる。通常、硫化物形成能の高い元

素は酸化物形成能が高い場合が多いため、本報では特に硫化物形成傾向の強い元素に着目して文献調査を行った。この場合、機械構造用鋼の硫化物基本組成は一般にMnSであるため、Mnよりも硫化物形成傾向の強い元素であることを条件とした。その結果、硫化物形態制御型快削鋼として既に幾つかの検討例が報告されているCaをはじめ¹⁹⁻²³⁾、種々の元素が候補として挙げられた。そこで、低融点物質を検討した場合と同様に、鋼中への添加実験を繰り返してスクリーニングを行い、機械的性質や被削性を確認した結果、Mg、Caを複合添加した硫化物形態制御鋼がPbフリー快削鋼としての可能性があることがわかった。

3. 硫化物分散および形態に及ぼすMg, Ca添加の影響

Fig.1にJASO S2鋼（約0.1mass%S）と、さらにMg, Caを複合添加したMC2鋼（約0.1mass%S + Mg, Ca）中に存在する硫化物の光学顕微鏡写真を示す。両鋼ともJIS SCr440を基本鋼としている。鑄込みままの硫化物を見ると、S2鋼では凝固組織の影響を受け、いわゆるⅡ型硫化物²⁴⁾として偏在しているのに対して、MC2鋼ではⅢ型硫化物²⁴⁾となり比較的均一に分散している。熱間鍛伸材の場合を見ると、S2鋼の硫化物は偏在したまま延伸してお

り、一部分断も認められるが、MC2鋼の硫化物は均一に分散し、且つ分断が起こっていないために比較的断面積が大きく保たれている。そこで、Mg, Ca添加によって硫化物の分散や形態が変化する理由を調べるために、MC2鋼中の硫化物をEPMAで分析した。その結果をFig.2に示す。硫化物の中には高融点のMgO-Al₂O₃のスピネル型酸化物が存在し、これが核となって硫化物が晶出した結果、均一分散したものと考えられる。さらに、硫化物自体はMg, Caを均一に固溶したMnSであり、通常のMnSよりも熱間強度が高い（変形能が低い）ために、鍛伸によって延伸し難く、分断も起こらなかったものと推定される。

4. 機械的性質に及ぼすMg, Ca添加の影響

Fig.3にJIS S45Cを基本鋼としたMC2鋼（0.098 mass%S + Mg, Ca）の引張特性（引張強さ、0.2%耐力、伸び、絞り）を、S45C（0.020mass%S）、Pb快削鋼であるJASO L2鋼（0.17mass%Pb, 0.028mass%S）、そしてS2（0.105mass%S）鋼と比較して示す。これらは焼入焼戻しによって硬さを約23HRCに調整している。Fig.3から鋼種間の差は特に認められず、MC2鋼中の硫化物は他の鋼中介在物と同様、これらの引張特性に影響を及ぼしていないことがわかる。

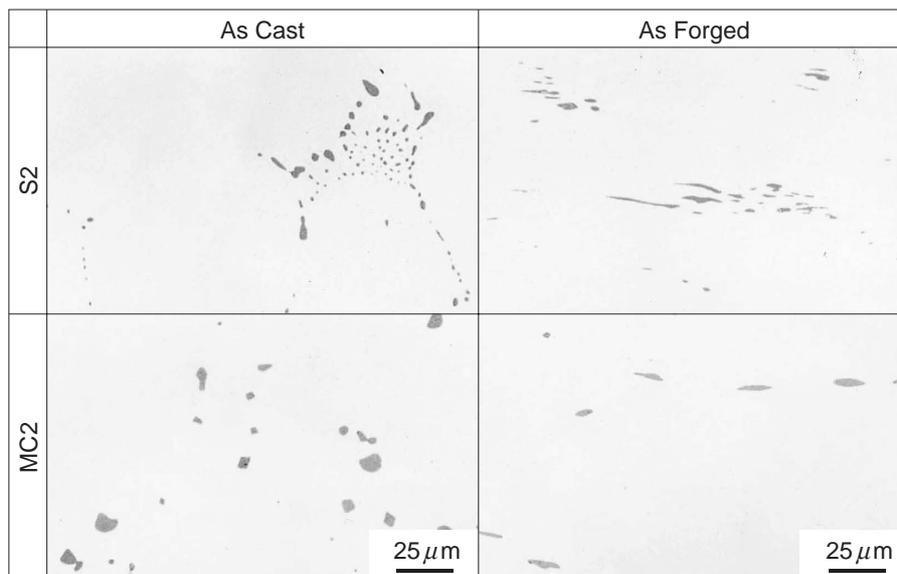


Fig.1. Optical micrographs of sulfides. (SCr440)

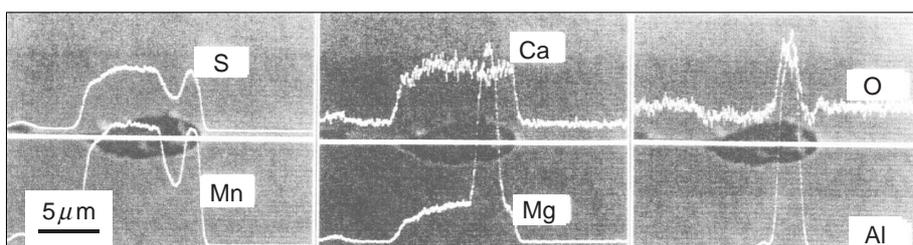


Fig.2. EPMA line scanning of the sulfide inclusion in MC2. (SCr440)

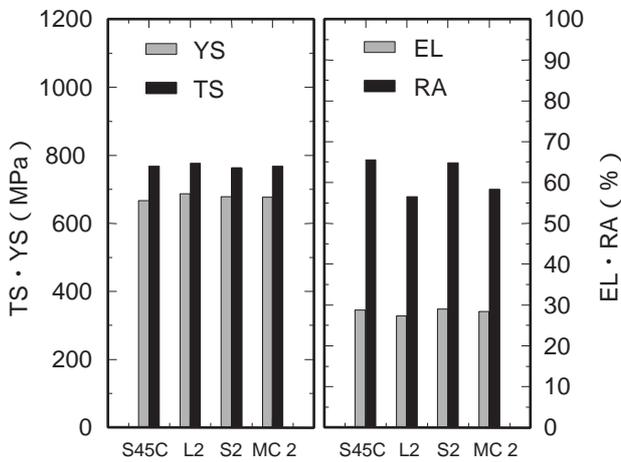


Fig.3. Comparison of tensile properties. (JIS No.4 test piece, S45C QT)

次に、機械構造用部品の多くが疲労強度設計されていることを考慮して、MC2鋼とL2鋼の小野式回転曲げ疲労試験（平滑試験片）を行った。その結果、Fig.4に示すように両鋼共に同等のS-Nカーブを示しており、MC2鋼とL2鋼の疲労限度は同等であることが確認された。

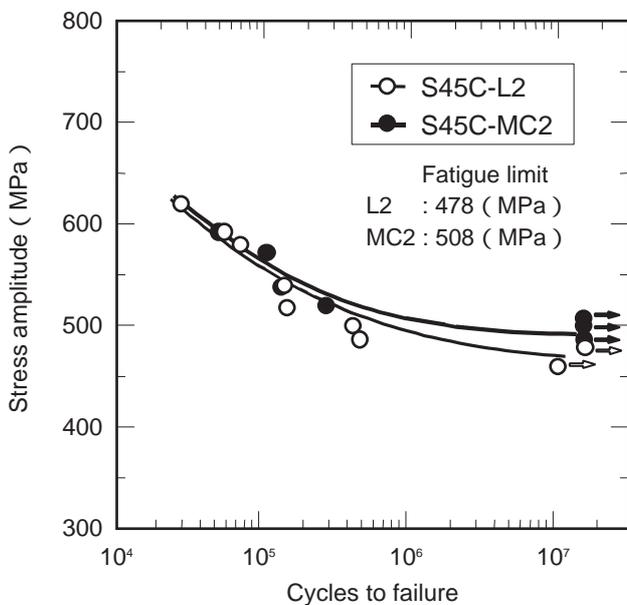


Fig.4. SN diagram of rotating bending fatigue test. (Unnotch test piece, Parallel part φ 8mm, S45C QT)

一方、前述したように硫化物系快削鋼で最も大きな欠点は衝撃特性の異方性である。Fig.5は、各鋼種のL方向（鍛伸方向の試験片）およびT方向（鍛伸方向と直角方向の試験片）のシャルピー衝撃値と、衝撃異方性（T方向衝撃値/L方向衝撃値）を示している。MC2鋼の衝撃値は、S45C基本鋼やL2鋼と比較すると低下しているが、S2鋼と比較するとT方向衝撃値および衝撃異方性が向上してい

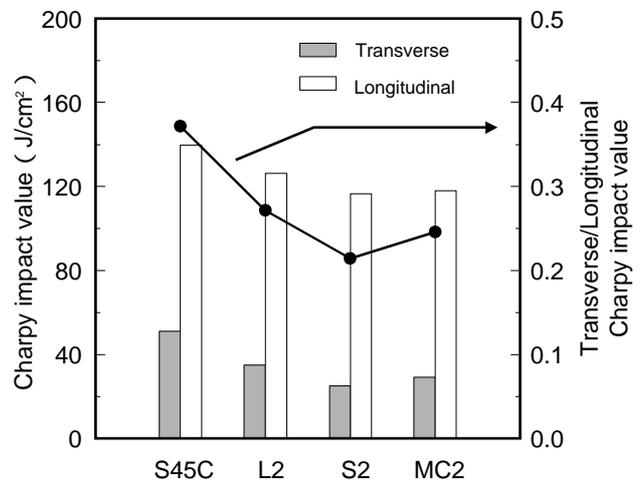


Fig.5. Comparison of Charpy impact properties. (JIS 2mm U-notch test piece, Room temp., S45C QT)

ることがわかる。これは、硫化物の個数、長径、アスペクト比（長径/短径）で説明が可能と考えられる²⁾。新堂ら²⁵⁾もMg-Ca添加によってT方向衝撃値が向上する傾向を認めており、その結果を硫化物のアスペクト比、体積率、分布均一度なる指標で整理している。Fig.6に、衝撃異方性とS含有量の関係に及ぼすMg-Ca添加の影響を示す。ここでは、JASO ASVa45Cフェライト・パーライト型非調質鋼を基本鋼としている。S量増加と共に衝撃異方性は劣化するが、Mg-Ca添加鋼では同一S量でも異方性が改善されるため、被削性に有効なSの増量が可能になることがわかる。

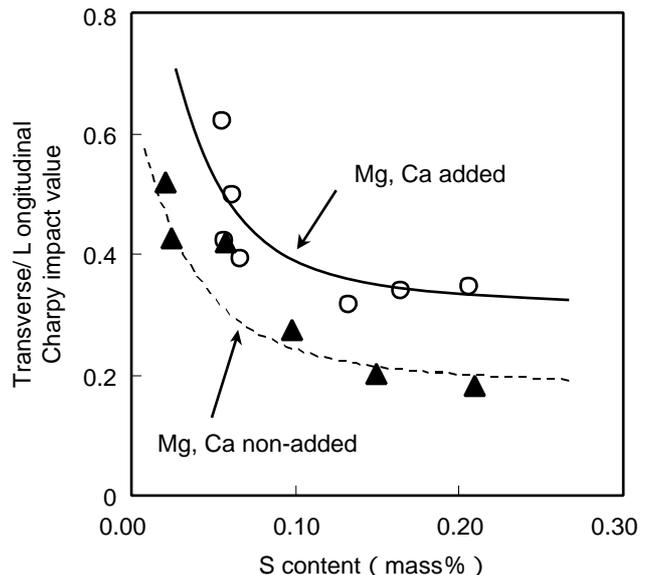


Fig.6. Influence of S content and Mg, Ca addition on impact anisotropy. (JIS 2mm U-notch test piece, Room temp., ASVa45C)

5. 被削性に及ぼすMg, Ca添加の影響

被削性評価のために、上述のS45Cを基本鋼とした焼入焼戻し材を用いてハイスドリル寿命、旋削超硬工具摩耗特性、および超硬工具切屑処理性に及ぼす各種快削性物質の影響を比較した。それぞれの切削試験条件をTable2に示す。この場合の被削性目標はL2鋼である。Fig.7にハイスドリル寿命に及ぼす切削速度の影響を示す。S45Cと比較してS2鋼やL2鋼は大幅にハイスドリル寿命が向上している。一方、MC2鋼はS2鋼と同等のS含有量であるにもかかわらず、さらにドリル寿命が優れており、また高速切削側になるほどその有効性が大きくなることわかる。

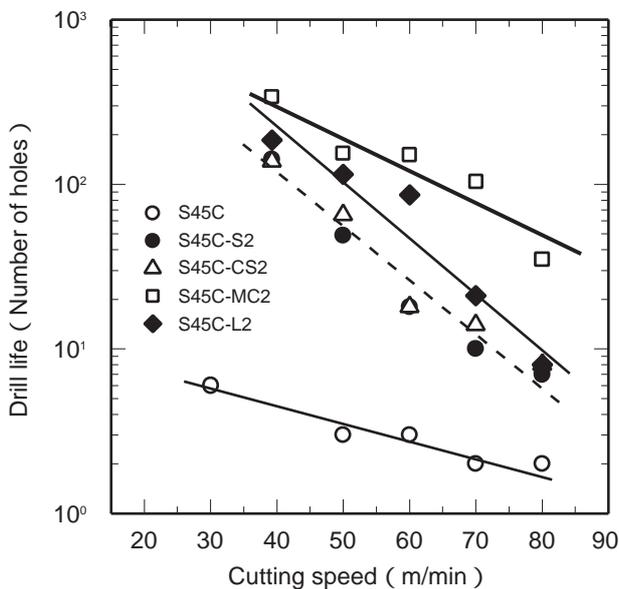


Fig.7. Influence of cutting speed on drill life. (S45C QT)

なお、比較材であるCS2鋼 (0.115mass%S+Ca) のドリル寿命はS2鋼と同等であり、Ca添加の優位性は見られなかった。また、Caの代わりにMgを単独で添加した場合でも同様な傾向であることを確認している。すなわち、Ca, Mg単独添加では効果が現れず、Mg-Caを複合添加した場合に、同一S量でハイスドリル寿命を改善できることがわかった。この理由は今後の検討課題であるが、Mg-

Ca複合添加による硫化物の物性、分布、形態、個数、大きさ²⁾等の変化が影響しているものと考えられる。また、家口ら²⁶⁾もMg-Ca複合添加によるドリル寿命向上やドリル切削抵抗の低減を報告しており、この改善機構として、酸化物の硫化物中への内包による無害化や硫化物の形態制御の可能性を指摘している。

Fig.8に旋削超硬工具摩耗試験結果を示す。S45Cと比較してL2鋼は逃げ面摩耗の抑制効果が認められるが、さらにMC2鋼は逃げ面摩耗、すくい面摩耗共に最も少なく、

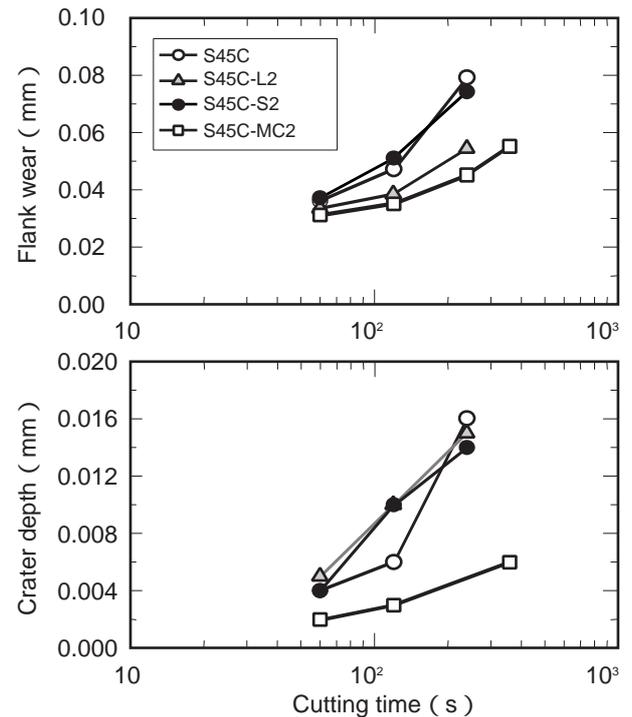


Fig.8. Relationship between carbide tool wear and cutting time. (S45C QT)

極めて耐工具摩耗性に優れていることがわかる。Fig.9は旋削後の工具刃先をEPMA分析した結果である。Fig.9より、すくい面の摩耗部分には硫化物と同様の組成のMn, Mg, Ca, Sが多く付着しており、逃げ面でも同様な付着物が観察された。なお、S2鋼でも硫化物と同じ組成の付着物は確認されたが、MC2鋼ではCaやMgを含有することで工具耐摩耗抑制効果が向上したものと推定される。さらに、工具摩耗部分にはAlも僅かであるが観察された。この

Table2. Cutting conditions for machinability test.

	Drill life	Turning tool wear	Chip breakability
Tool	SKH51, ϕ 5mm	P20 (carbide), 0.4mmR	P20 (carbide), 0.4mmR
Cutting speed	30 ~ 80 m/min	150 m/min	150 m/min
Feed rate	0.2 mm/rev	0.2 mm/rev	0.15, 0.20, 0.30 mm/rev
Depth of cut	15mm (Depth of hole)	0.5 mm	0.5 mm
Cutting fluid	None (Dry)	None (Dry)	None (Dry)

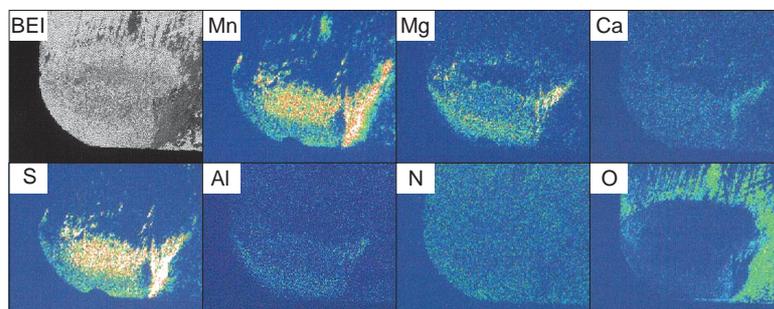


Fig.9. EPMA mapping of the rake face of the carbide tool after turning for 360 sec. (MC2)

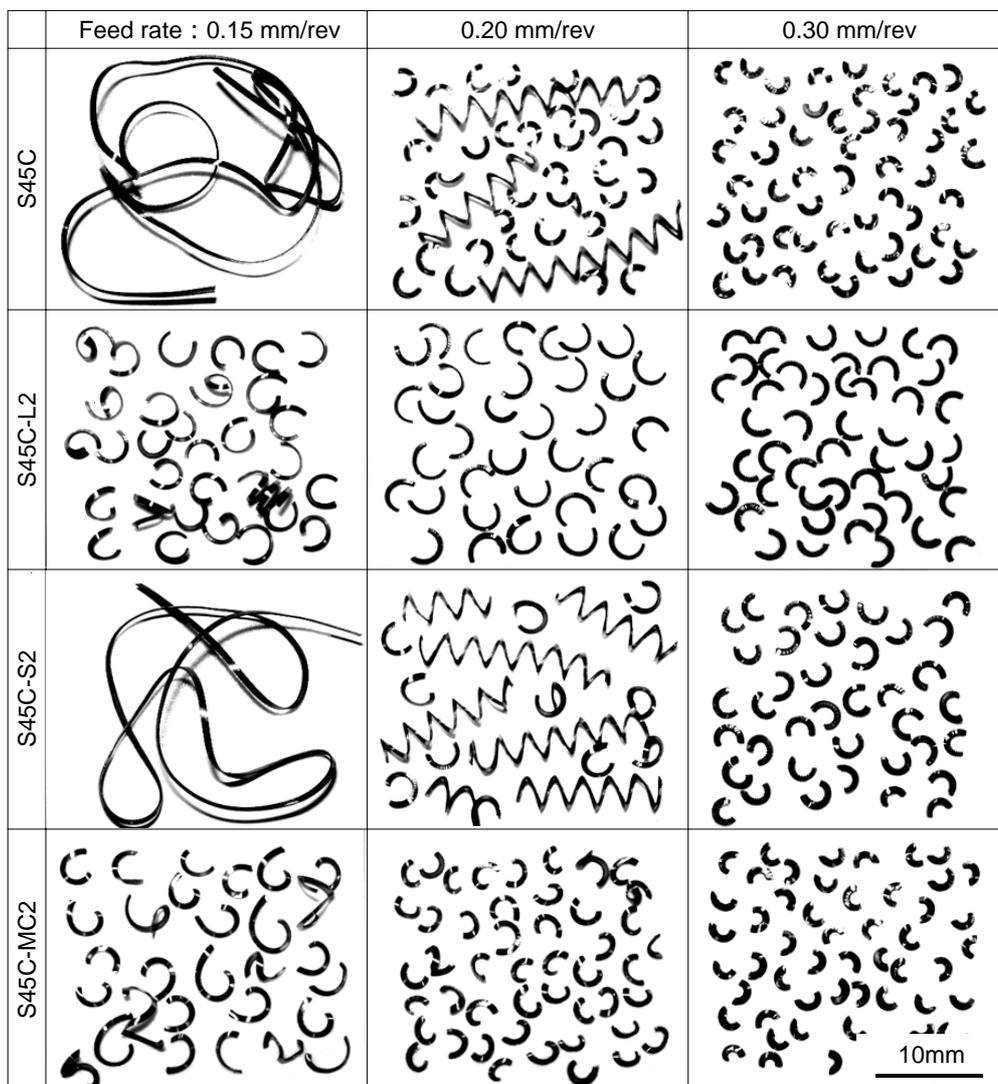


Fig.10. Chips of carbide tool turning. (S45C QT)

Alの化合物組成は酸化物と窒化物が考えられるが、S快削鋼へのCa添加によって超硬工具刃先に付着するAlN量が増加することを以前に報告しており²³⁾、Mg-Ca添加でも同様な現象が起こっているものと考えられる。つまり、硫化物のみならず窒化物の付着による工具被覆も耐工具摩耗性を改善した理由と推定される。

Fig.10は超硬工具旋削時の切屑写真を示している。前述のようにPb添加の最大の利点は切屑の分断効果であるが、本切削条件においてはMC2鋼の切屑形状もL2鋼とほぼ同様であり切屑処理性も良好であることがわかる。この理由も、ドリル寿命と同じく硫化物の存在状態に起因するものと考えられる。

6. 結言

環境負荷物質であるPbに代替できる快削性物質を模索するために、切削機構の観点から文献等の資料調査を行い、溶製実験によるスクリーニングを繰り返した結果、Mg-Ca系硫化物が有望であることがわかった。この硫化物を利用したMg-Ca-S快削鋼（約0.1mass%S）の諸特性を、同一S量のS快削鋼およびPb快削鋼（0.17mass%Pb）と比較した結果を以下にまとめる。

- 1) Mg-Ca-S快削鋼の引張特性や疲労強度はPb快削鋼と同等である。
- 2) Mg-Ca-S快削鋼の衝撃異方性は、Pb快削鋼に及ばないがS快削鋼よりも改善される。
- 3) ドリル寿命、超硬工具耐摩耗性、そして切屑処理性は、Pb快削鋼と同等あるいはそれ以上である。特に高速切削時の工具寿命が良好である。

以上の結果から、Mg-Ca-S快削鋼はS含有量の調整によってPb快削鋼代替に利用できる可能性が高く、さらに、工具寿命に優れる新快削鋼としての利用も有効であると考えられる。

文 献

- 1) G. Bernsmann, M. Bleyemehl, R. Ehl and A. Hassler : Stahl und Eisen , 121 ,(2001) , 87 .
- 2) 常陰典正, 平岡和彦, 小林一博, 内山雅夫, 岩間直樹, 森元秀, 大庫和孝 : 材料とプロセス , 15 ,(2001) , 1233.
- 3) 佐藤公保, 加藤英久, 岩間直樹, 常陰典正, 小林一博, 森元秀, 大庫和孝 : 材料とプロセス , 15 ,(2001) , 1234.
- 4) 染川雅実, 鹿嶋正人, 松島義武, 家口浩 : R&D 神戸製鋼技報 , 51 ,(2001) , 13.
- 5) 家口浩 : 鉄と鋼 , 77 ,(1991) , 683.
- 6) 木村篤良 : 第96, 97回 西山記念講座, 日本鉄鋼協会 ,(1984) , 129.
- 7) 成田貴一, 山口喜弘, 八木直臣, 下畑隆司 : 鉄と鋼 , 62 ,(1976) , 885.
- 8) 木村篤良 : 特殊鋼 , 35 ,(1986) , 16.

- 9) 赤沢正久 : 第96, 97回 西山記念講座, 日本鉄鋼協会 ,(1984) , 99.
- 10) 伊藤哲朗 : 精密機械 , 49 ,(1983) , 124.
- 11) 大野鐵 : 第96, 97回 西山記念講座, 日本鉄鋼協会 ,(1984) , 157.
- 12) J. McManus : Metal. Prog. , 89 ,(1966) , 68.
- 13) 羽生田智紀, 中村貞行 : 電気製鋼 , 65 ,(1993) , 4.
- 14) 片山昌, 浅野巖之, 橋村雅之 : 材料とプロセス , 5 ,(1992) , 847.
- 15) 山根八洲男, 田中隆太郎, 鳴瀧則彦 : 精密工学会誌 , 64 ,(1998) , 1370.
- 16) 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.
- 17) 岩間直樹, 内山雅夫, 大脇進, 熊谷憲一, 大庫和孝, 内藤国雄 : 材料とプロセス , 12 ,(1999) , 1387.
- 18) 和田攻 : 金属とヒト, 朝倉書店 ,(1992) , 274.
- 19) N. Tsunekage and H. Tsubakino : ISIJ International , 41 ,(2001) , 498.
- 20) 小川兼広, 山中量一, 小山伸二, 佐々木俊彦 : R&D 神戸製鋼技報 , 41 ,(1991) , 65.
- 21) 狩野隆, 次井慶介, 中村貞行 : 電気製鋼 , 71 ,(2000) , 89.
- 22) 常陰典正 : 機械技術 , 48 ,(2000) , 41.
- 23) N. Tsunekage, K. Kobayashi, and H. Tsubakino : Proceedings of The International Conference on Steel and Society , The Iron and Steel Institute of Japan ,(2000) , 299.
- 24) C. E. Sims and F. B. Dahle : Trans. A. F. A. , 46 ,(1938) , 65.
- 25) 新堂陽介, 家口浩, 土田武広, 染川雅実, 鹿嶋正人 : 材料とプロセス , 14 ,(2001) , 706.
- 26) 家口浩, 新堂陽介, 土田武広, 坂本浩一, 染川雅実, 鹿嶋正人 : 材料とプロセス , 14 ,(2001) , 1235.

著者



常陰 典正



藤松 威史



平岡 和彦