

(論文)

介在物形態制御タイプ鉛フリー快削鋼

Non-lead-added Free Machining Steel by Sulfide Inclusion Morphology Modification



家口 浩*(Ph.D.)
Dr. Hiroshi Yaguchi



土田武広*
Takehiro Tsuchida



新堂陽介*
Yousuke Shindou



坂本浩一*(工博)
Dr. Kouichi Sakamoto



染川雅実**
Masami Somekawa



鹿磯正人**
Masato Kaiso

Sulfide morphology modification type Pb-free machine structural free-machining steel was investigated by adding Mg(+Ca). It was observed that Mg(+Ca) additions make the distribution of sulfide inclusions more uniform and the shape of the inclusions more globular. Both of these factors improve transverse direction impact toughness. Drill life and carbide turning tool life were also improved by Mg(+Ca) additions. The formation of belag and the reduction of the cutting force are believed to be the reasons that contribute to tool life improvement.

まえがき = 快削鋼の被削性向上に鉛(Pb)の添加が広く行われているが、環境問題から、Pbを含まない快削鋼の開発が要望されている。いくつかの方法が検討、報告されているが、その中でも現実的な手法として、被削性向上にPbと同様に現状でも広く利用されているMnS系硫化物の効果をさらに有効に活用することが考えられ、機械構造用鋼へのいくつかの検討事例が報告されている^{1)~8)}。硫化物を含有する快削鋼の被削性と機械的特性は、硫化物形状によって変化するので、これらの制御が重要であることが判明している²⁾³⁾⁸⁾⁹⁾。本報告では、硫化物の形状制御に追加し、これまで着眼されていなかった硫化物系介在物の分布状態にも着眼して、Mg単独及びMg及びCa複合添加によるPbフリー快削鋼の検討を行った結果を報告する。

1. 実験方法

表1に典型的成分を示すS30C鋼にSを0.056%添加した鋼材を基準として、S量を0.013~0.091%の間で変化、Mg量を無添加から0.006%、Ca量を無添加から0.004%

まで変化させて添加した鋼種をラボ真空誘導溶解炉で溶製した。溶製後、熱間鍛造で直径52mmまで鍛造、850×60minで焼きならし後、1100×30minでオーステナイト化し水冷で焼入れた。焼戻しは、580-600×2h、水冷の条件で実施したが、焼戻し温度は、硬さをHVで約270に合わせるために調整した。また、比較鋼として、実機溶製のPb添加鋼(L1=0.07%添加とL2=0.20%添加)、S添加鋼(S1=0.06%添加とS2=0.09%添加)を評価した。

被削性試験としては、表2に条件を示す超硬旋削試験とドリル試験を実施した。硫化物の観察は光学顕微鏡とEPMAを用いて行った。MnS形態の定量分析は光学顕微鏡で実施したが、一般的なサイズやアスペクト比の測定以外に、分布の均一性を示す指数を考案し、合わせて測定した¹⁰⁾。

2. 結果及び考察

2.1 介在物形態

写真1に、鍛造後の硫化物形態に及ぼすMgあるいは

表1 典型的成分
Table 1 Typical chemical composition of the samples used

(mass%)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Mg	Ca
0.31	0.23	0.88	0.013	0.056 (0.013 - 0.091)	0.13	0.014	0 - 0.006	0 - 0.004

表2 切削試験条件
Table 2 Machinability testing conditions

Carbide turning test	Drill test
Tool : P10	Drill : High speed 10mm straight drill
Cutting speed : 200m/min	Cutting speed : 50m/min
Feed : 0.25mm/rev.	Feed : 0.2mm/rev.
Depth of cut : 1.5mm	Depth of hole : 22mm blind, dry
Evaluation : Tool wear (KT, VB)	Evaluation : End of tool life

*技術開発本部・材料研究所 **鉄鋼部門・神戸製鉄所・条鋼技術部

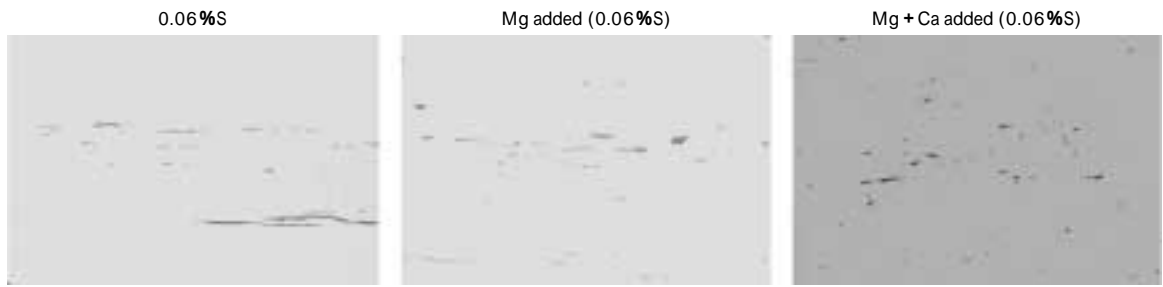


写真1 鍛造材中の硫化物形態に及ぼす Mg (+ Ca) 添加の影響
Photo 1 The effect of Mg (+ Ca) addition on sulfide inclusion morphology in forged samples

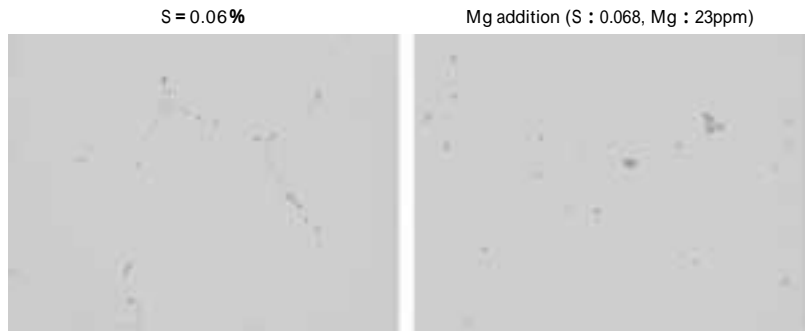


写真2 鑄造まま硫化物の分布に及ぼす Mg 添加の影響
Photo 2 The effect of Mg addition on the sulfide distribution in as-cast structure

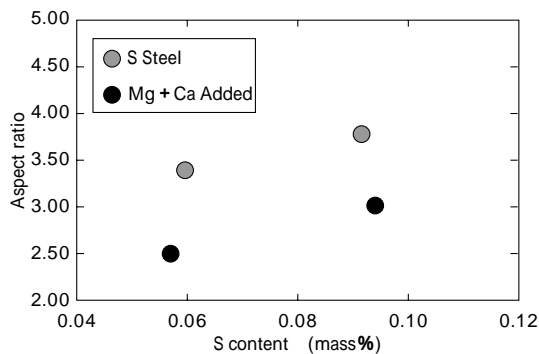
Mg + Ca 添加の影響を示す。Mg (+ Ca) 添加により、硫化物の展伸が抑制され、さらに分布が均一になっていることが観察された。硫化物の球状化と分布の均一化は S 量の異なる鋼種の定量的比較においても、図 1 のように確認された。分布指数は 1 に近づくほど均一分布になる。

Mg (+ Ca) 添加がどのように硫化物の形態と分布に影響を及ぼすかを調べるために、介在物の詳細観察を行った。写真 2 に鑄造ままの硫化物の分布を示す。Mg 無添加鋼では、鑄造デンドライト組織に沿った分布で Sims¹¹⁾

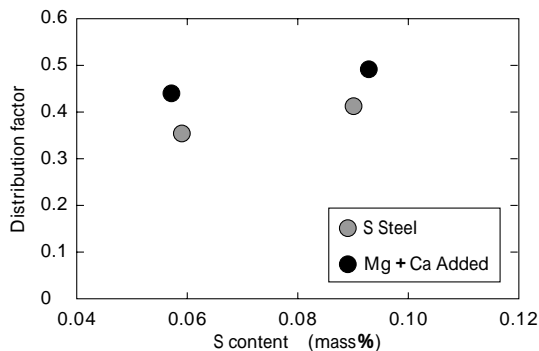
の分類による典型的な Type の硫化物形態を示すが、Mg (+ Ca) 添加鋼では、鑄造時より均一な分布であることが観察された。この傾向は Mg 単独添加鋼でも観察されるので、Mg の効果と考えられる。

Mg (+ Ca) 添加鋼においては、多くの硫化物の中心に酸化物が観察された。写真 3 に EPMA で観察した Mg + Ca 複合添加鋼の鍛造後の典型的な複合介在物の例を示す。酸化物と硫化物部分の EPMA 解析結果も示しているが、介在物サイズが小さく周囲の影響が大きいため、定量性には信頼性がない。しかし、酸化物と硫化物の両方に Mg と Ca が含まれていることが観察でき、Al, Mg, Ca が複合したスピネル系酸化物であると推測された。さらに、酸化物のほぼ全数が硫化物に囲まれ、酸化物単独で存在する例は観察されなかった。

これらの観察結果より、文献に報告されているように、Mg 添加により微細な Mg 系酸化物が多数生成し^{12) 13)}、それを核として硫化物が生成するために、均一な分布に



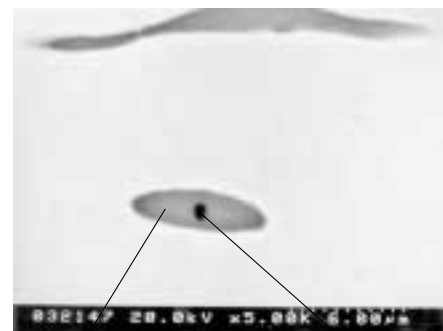
(a) Sulfide inclusion aspect ratio



(b) Sulfide inclusion distribution factor

図1 硫化物アスペクト比と硫化物分布指数に及ぼす Mg + Ca 添加の影響

Fig. 1 The effect of Mg + Ca addition on sulfide inclusion aspect ratio and distribution factor



Composition of sulfide	
Mn	: 45.9%
S	: 28.3%
Mg	: 0.6%
Ca	: 0.7%
Fe	: 24.6%

Composition of oxide	
Al	: 5.1%
Mn	: 38.7%
S	: 24.4%
Mg	: 1.3%
Ca	: 0.6%
Fe	: 30.0%

写真3 硫化物生成核としての Mg + Ca 系酸化物
Photo 3 Mg + Ca type oxide inclusion as a nucleus of sulfide inclusion

なると推測された。さらに、Mg + Ca が硫化物中に固溶することで 熱間加工中の変形を抑制すると考えられた。

2.2 機械的性質

硫化物量の増量では、圧延・鍛造方向と直角の方向(横目)の靱性や疲労強度が低下することが問題となる。硫化物の展伸を抑制させる Mg(+Ca)添加は、横目の機械的特性を改善させる効果が期待できる。0.06% S 含有鋼への Mg + Ca 複合添加の結果、横目靱性は、図 2 に示すように、同量 S で Mg + Ca 無添加鋼の 1.7kgf・m/cm² から 2.7kgf・m/cm² 以上へと改善された(S30CS1MgCa(L))。改善効果は、Mg と Ca の添加量によって影響を受けるが、多量に添加した鋼材では、S = 0.02% の基本鋼よりも優れた特性を示した(S30CS1MgCa(H))。Ca 単独添加では改善効果が見られなかった。また横目靱性は、これまで知られていた硫化物の体積率、形状(アスペクト比)だけでなく、分布指数の影響を受けることが重回帰の結果明らかになった。その結果を図 3 に示すように、分布を均一にする Mg (+ Ca) 添加の効果が裏づけされた。

2.3 被削性

図 4 にドリル寿命試験結果を示す。Mg 単独あるいは Mg + Ca 複合添加鋼の両方で、同一 S 量(0.06%) 添加鋼と比較して良好なドリル寿命を示している。また Pb 添加鋼よりも優れている。図 5 に超硬旋削切削試験でのすくい面磨耗測定結果を示す。Mg + Ca 添加鋼は、同量の S 添加鋼や Pb 鋼と比較して良好な特性を示している。逃げ面磨耗も同様に Mg + Ca 添加鋼では改善される

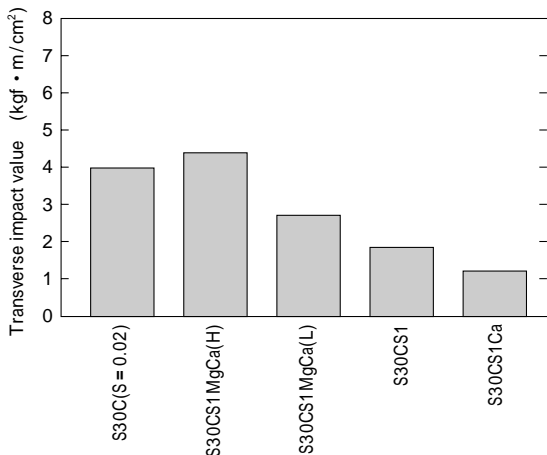


図 2 横目靱性に及ぼす Mg + Ca 添加の影響
Fig. 2 The effect of Mg + Ca addition on transverse impact property

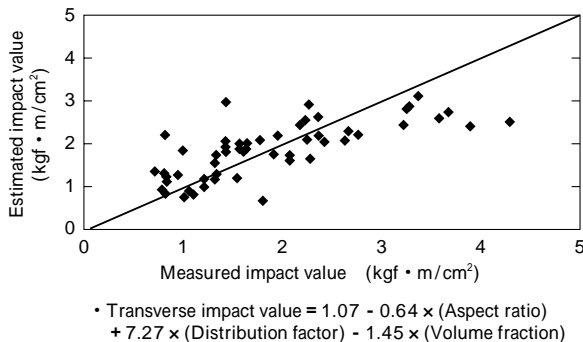


図 3 横目靱性に及ぼす硫化物の体積率、形態と分布指数の影響
Fig. 3 The effect of volume fraction, aspect ratio and distribution factor on transverse impact property

効果が確認された。

超硬工具の磨耗抑制効果として、従来から Ca 添加によるペラーグの生成効果が知られている¹⁴⁾。同様の現象が Mg + Ca 添加鋼でも起こっているかどうかを確認するために、切削後の工具面を EPMA で観察した。典型的なすくい面の観察結果を写真 4, 5 に示すが、比較鋼の S 鋼では磨耗が大きく、ペラーグの生成は観察されなかった。それに対して、写真 5 の Mg + Ca 添加鋼では、磨耗が小さく、またペラーグの生成が確認できた。従って、ペラーグの生成が超硬工具磨耗の低減に寄与していると考えられる。しかし、切削速度が遅く切削温度が上昇しないドリル加工においてもペラーグの生成がドリル寿命改善の主なメカニズムであるとは考え難い。さらに、図 6, 7 に示すように、ドリル、超硬旋削ともに Mg + Ca 添加鋼は切削抵抗が減少する傾向が観察されており、工具寿命改善に寄与していると考えられる。この切削抵抗の減少は、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ていることも理由として考えられる。

むすび = 硫化物形態制御タイプ鉛フリー快削鋼として、Mg(+Ca) 添加に着目し、硫化物形態、被削性と機械的特性を調査した。

Mg(+Ca) 添加は、硫化物を均一に分布させると同時に、熱間加工時の展伸を抑制させる。この効果は、微細 Mg 系酸化物が多数生成し、硫化物生成の核として働くため、ならびに硫化物中に固溶した Mg と Ca が熱間で硫化物の変形抵抗を上昇させるためと考えられる。

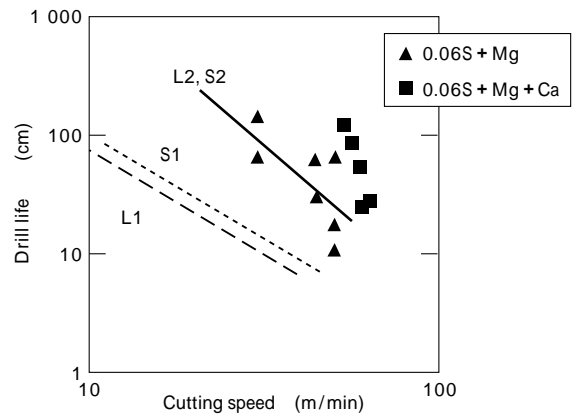


図 4 Mg, Mg + Ca 添加鋼のドリル寿命
Fig. 4 Drill life of Mg and Mg + Ca containing steels

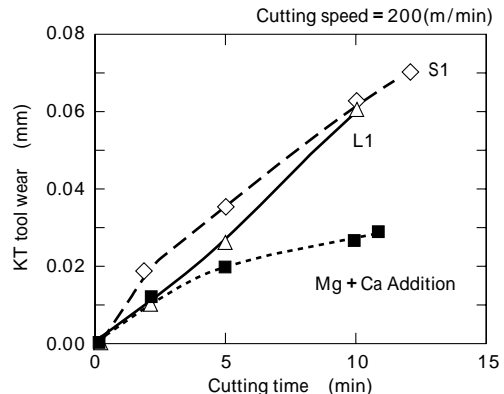


図 5 Mg + Ca 超硬旋削工具磨耗
Fig. 5 Carbide tool wear of Mg + Ca containing steel

写真4 S鋼切削後のすくい面のEPMA解析
Photo 4 EPMA analysis of the crater wear after machining S steel

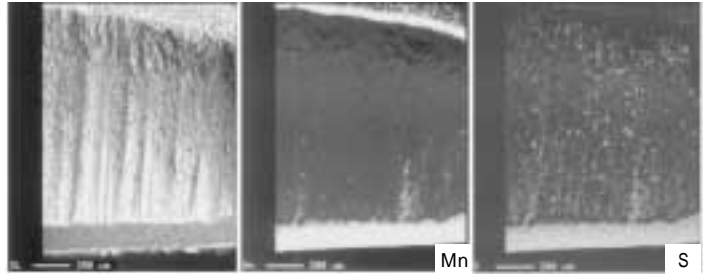


写真5 Mg+Ca添加鋼切削後のすくい面のEPMA解析
Photo 5 EPMA analysis of the crater wear after machining Mg+Ca containing steel

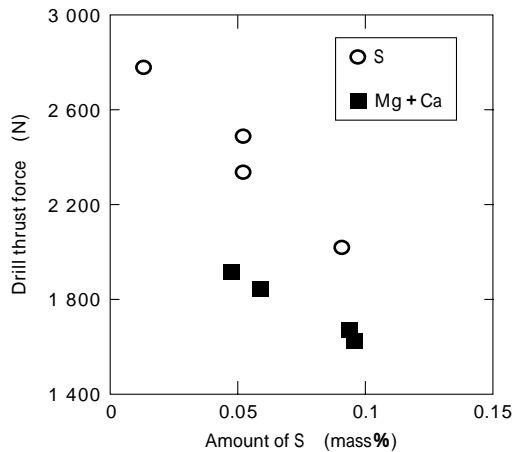
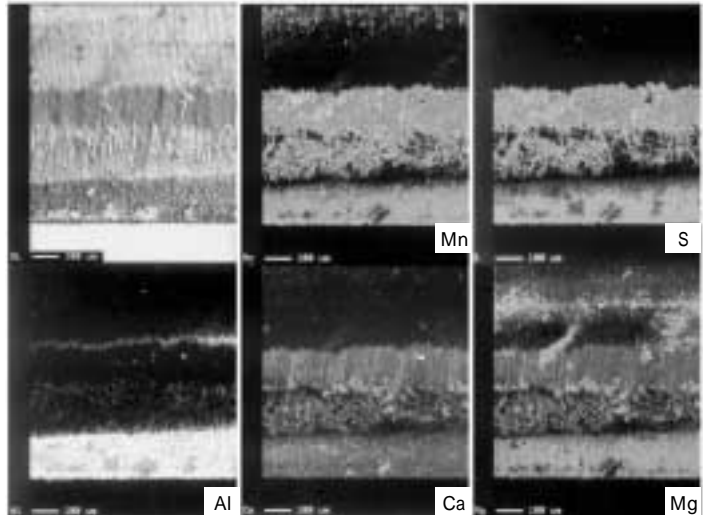


図6 ドリルスラスト力低減に及ぼす Mg+Ca 添加の効果
Fig. 6 The effect of Mg+Ca addition on the reduction of drill thrust force

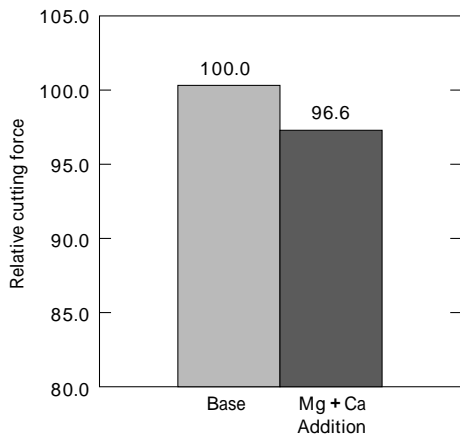


図7 超硬旋削切削抵抗に及ぼす Mg+Ca 添加の影響 (比較鋼を 100 として表示)
Fig. 7 The effect of Mg+Ca addition on relative carbide turning cutting force (Base steel is expressed as 100)

Mg+Ca 添加により横目靱性の向上が確認できた。これは、従来から知られている硫化物の展伸抑制だけでなく、均一分布の効果も大きいことが明確になった。

Mg+Ca 添加によりドリル寿命と超硬旋削工具寿命が改善できた。超硬旋削工具寿命改善は、酸化物の組成制御によるベラークの生成が理由と考えられるが、切削抵抗の減少も観察され、これらの効果が合わさって工具寿命改善に寄与している。

参考文献

- 1) D. J. Naylor et al. : Metals Tech., Vol.3 (1976) p.254.
- 2) Y. Yamaguchi et al. : Int. Symp. : Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, Tokyo, (1977) p.289.
- 3) D. Bhattacharya : Met. Trans. A, Vol. 12A (1981) p.973.
- 4) I. G. Davies et al. : Ironmaking and steelmaking Vol.17(1990) p.343.
- 5) 狩野 隆 : 機械技術, Vol.47 (1999) p.35.
- 6) 常陰典正 : 機械技術, Vol.48 (2000) p.41.
- 7) 家口 浩 : 熱処理, Vol.41 (2001) p.191.
- 8) 速石正和ほか : 電気製鋼, Vol.73 (2002) p.5.
- 9) 岩田一朗ほか : 精密機械, Vol.43 (1977) p.39.
- 10) 新堂陽介ほか : CAMP-ISIJ, Vol.13 (2000) p.1244.
- 11) C. E. Sims : Trans. TMS-AIME, Vol.215 (1959) p.367.
- 12) S. K. Saxena : 3rd Int. Conf. on Clean Steel, The Inst. of Metal, (1986) p.128.
- 13) S. K. Saxena : Proc. Steelmaking Conf, (1996) p.89.
- 14) 大野 鉄 : 第 96, 97 回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1984) p.157.