

論 文

SCM420H 鋼の被削性に及ぼす脱硫の影響

福永秀春*・赤澤正久*²

Effect of Desulfurization on the Machinability of SCM420H Steel

Hideharu FUKUNAGA and Tadahisa AKASAWA

Synopsis :

Machinability of low alloy steels with extra-low and ordinary sulfur contents was studied by means of turning tests using sintered carbide tools under conventional machining conditions. The results are as follows. Reduction in sulfur contents decreases chip breakability, improves surface roughness and topography at cutting speeds of 100m/min or higher, and exerts only a minor effect on tool life and cutting forces. On the whole, the desulfurized steel can be machined at a high removal rate without any serious problem, provided proper cutting conditions are selected and the smooth machined surface thus obtained promises a good tribological effect.

It was discussed and found that there was no difference between the mechanisms accounting for the effects of desulfurization and those of resulfurization on the machinability of steel.

1. 緒 言

近年、鋼の脱硫技術の向上にともなつて、極めて S 含有量の低い鋼を溶製することが可能になつてきた¹⁾。鋼中の S 含有量を低減すると、冷間加工性や耐転がり疲れ強さが改善される。ところが S はよく知られた快削添加元素であるから、S を低減することによつて被削性が極端に悪化しないかと懸念される。JIS によれば低合金肌焼鋼の S 量は 0.03% 以下と規定されており、従来の市販品は 0.02% 程度の S を含有しているものが多い²⁾。

また、我が国で自動車用などに 0.04~0.07% S を添加した S 快削肌焼鋼や強靱鋼も使用されており³⁾、米国では 0.035~0.05% S を添加した SAE 4028 鋼が被削性のすぐれた歯車材として多用されたことがある⁴⁾。さらに、山本ら⁵⁾は 0.2% 程度まで S を添加した SCM 21 の被削性を調べている。したがつて、約 0.02% 以上の S 含有量の被削性に及ぼす影響を経験的にも知ることができるが、それ以下に脱硫したときの低 S 含有量の影響は新しい問題であり、その調査報告がみあたらない。この研究は S を低減した肌焼鋼の被削性を調べ、その結果が S を添加した場合の被削性に関する従来の知見を外挿して得られるかどうかを検討したものである。

2. 被削材および実験方法

2.1 被削材

実験に用いた被削材は低合金肌焼鋼 (SCM 420 H)

である。被削材の記号とチェック分析結果を Table 1 に示す。YA 材は脱硫処理を施して S 量を 0.002% まで低減したものであり、YS 材は JIS のほぼ上限の S 量 0.031% を含有しており、以後それぞれ脱硫鋼および通常鋼と呼ぶ。NH および NS 材は精機学会切削性専門委員会での共同研究に使用された鋼で、広く被削性が調査されている⁶⁾ので、本実験との比較の意味で使用した。また、NH と NS 材は焼ならし温度が後述 Table 2 に示すように異なるが、その被削性は大同小異であることがあらかじめわかっている⁶⁾。なお、Table 1 より、不純物元素および合金添加元素量は 3 種の被削材ともあまり違つていないといえる。YA および YS 材は 500 kg の高周波誘導溶解炉で溶解し、所定の精錬を経て直径 100 mm の丸棒に鍛造した。NH および NS 材は 50 t 電気炉を用いた量産設備による通常溶解法によるもので、直径 75 mm の圧延棒材である。YA および YS 材に Table 2 に示す焼ならし処理を施し被削材とした。なお、Table 2 には NH, NS 材の処理条件および各材の熱処理後の硬さも併記した。Table 3 は被削材の常温および高温 (700°C) における機械的性質を示したものである。これらの表から、被削材の機械的性質は全般的に大きな差はないが、常温において脱硫鋼の伸びおよび絞りが若干すぐれており、NH および NS 材は硬さおよび降伏点が若干高い。

3 つの被削材の顕微鏡組織はいずれも通常の焼ならし組織を呈し、その差はほとんど認められなかつた。

昭和 55 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 11 月 26 日受付 (Received Nov. 26, 1982)

* 広島大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Hiroshima University, Shitami Saijo-cho Higashihiroshima 724)

*² 新日本製鉄(株)製品技術研究所 (Products R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

Table 1. Chemical compositions of work materials (SCM 420 H). (wt %)

Steels	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	sol Al	insol Al	sol N	insol N	O	SiO ₂	Al ₂ O ₃
YA	0.20	0.27	0.77	0.015	0.002	1.04	0.25	0.030	0.004	0.0092	<0.001	0.0042	0.0006	0.0077
YS	0.20	0.22	0.81	0.016	0.031	1.06	0.23	0.014	0.005	0.0047	<0.001	0.0061	0.0006	0.0091
NH	0.19	0.29	0.76	0.019	0.005	1.03	0.18	Total		Total		0.0031	—	—
NS								0.045	0.0105					

Table 2. Heat-treatment and hardness of work materials.

Steels	Heat-treatment (°C×h)	Hardness (HRB)
YA	900×4, Air cooling	78.6
YS	900×4, Air cooling	78.7
NH	1000×2, Air cooling	85.5
NS	870×2, Air cooling	82.0

Table 3. Mechanical Properties of work materials.

(a) At room temperature

Steels	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
YA	29.9	53.4	39.1	69.6
YS	29.2	51.5	35.5	68.2
NH	34.7	61.1	30.9	64.0
NS	34.6	58.3	33.2	67.9

(b) At 700°C

Steels	0.2% Proof strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
YA	7.2	12.7	55.5	95.1
YS	7.5	13.3	62.4	88.9

Table 4. Area fractions of inclusions determined by JIS Point-counting method.

Steels	dA	dB	dC	dT
YA	0.013	0.008	0.017	0.038
YS	0.108	0.021	0.017	0.146

Table 5. Turning conditions.

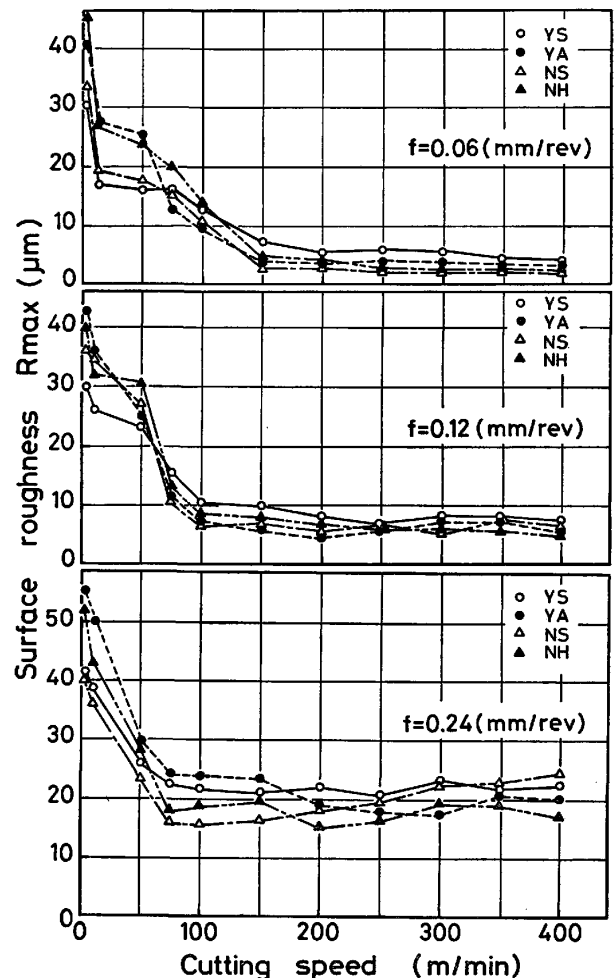
Cutting speed, V (m/min)	2~400
Feed, f (mm/rev)	0.06~0.3
Depth of cut, t (mm)	0.2, 1.0, 2.0, 3.0
Tool	P10 (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.4) Chip breaker width, 2.3mm
Cutting fluid	None

Table 4 は脱硫鋼と通常鋼の清浄度を測定した結果を示す。S含有量を低減すると介在物の全量が少なく、当然のことながら、とくにA系介在物の面積率が小さいことが特徴的である。

2.2 切削実験方法

切削実験は旋盤 (三菱エリコン HB 300 L) を用いて丸棒の外周長手切削を行い、仕上げ面あらさ、工具摩耗、切削抵抗および切りくず破碎性を調査した。仕上げ面あらさとしては万能表面形状測定器 (小坂研究所製

SE-3 型) を用いて旋削面の最大高さ R_{max} を測定した。工具摩耗は工具顕微鏡 (ライゼン) を用いて平均フランク摩耗幅を、また、万能表面形状測定器 (前出) を用いて最大クレータ深さを求め、それぞれフランク摩耗 VB, クレータ摩耗 KT とした。切削抵抗は工具動力計 (佐藤工業製 300 kA) を用いて切削 3 分力を測定した。使用した工具は超硬 P10 のスローアウェイ型であり、その他の切削条件をまとめて Table 5 に示す。なお、比較のため上記以外の切削条件も採用したが、それらについてはその都度記すこととし、切削速度、送りおよび切り込み量の記号として、それぞれ、 V , f および t を用いる。

Fig. 1. Surface roughness of work materials ($t=0.2$ mm).

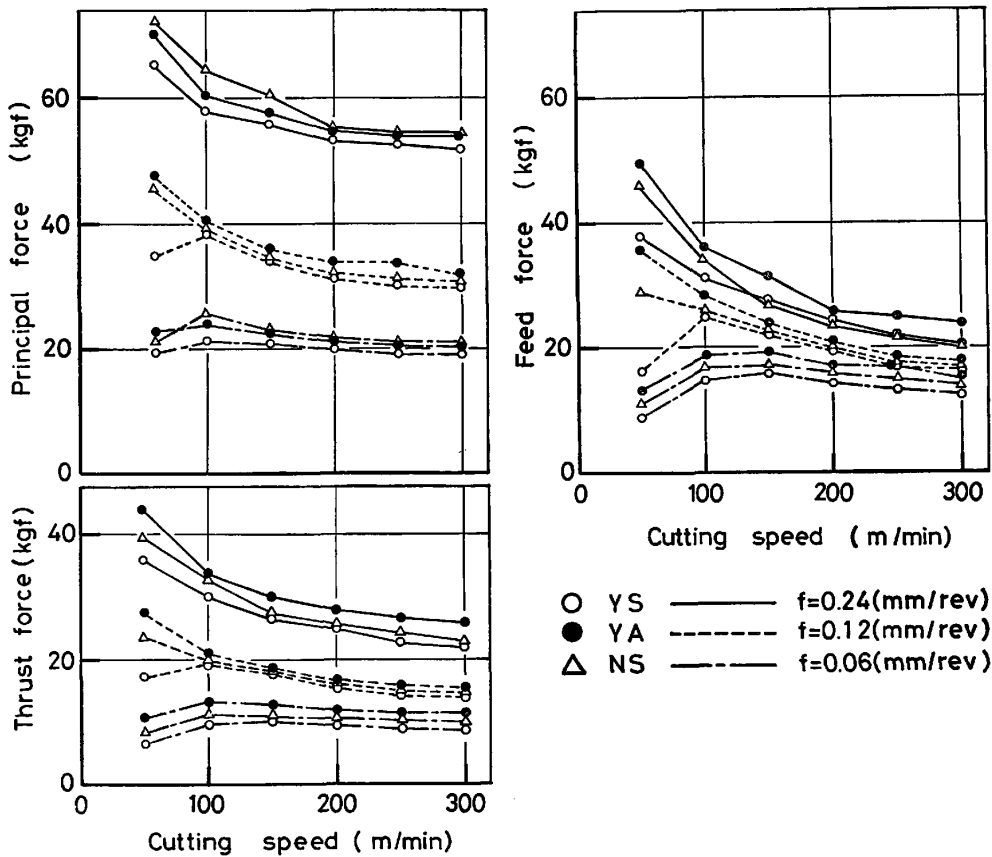


Fig. 2. An example of cutting forces of work materials ($t=1.0$ mm).

3. 実験結果

3.1 切削仕上げ面あらさ

Fig. 1 は切り込み 0.2 mm で送りと切削速度を変えて各種の被削材を旋削したときの仕上げ面あらさの平均値を示す。通常鋼の YS 材と脱硫鋼の YA 材を比較すると、いずれの送りの場合でも、仕上げ面あらさは低切削速度域では S 含有量の高い YS 材の方が小さく、中間の切削速度域で逆転し、高切削速度域になると S 含有量の低い YA 材の方が小さくなることわかる。また、いずれの被削材においても、仕上げ面あらさが切削速度に対してほぼ一定になるいわゆる臨界切削速度⁹⁾が存在し、その値は送りの大きさに依存することが明らかに認められるが、被削材の種類によつてはほとんど変わらないといえる。臨界切削速度は送り 0.06, 0.12 および 0.24 mm/rev のとき、それぞれ、約 150, 100 および 75 m/min であり、その速度に達するとすでに脱硫鋼の方が通常鋼より仕上げ面あらさが小さくなる逆転現象は完了しているとみなすことができる。

3.2 切削抵抗

切り込みを 1.0 mm と一定にして、切削速度と送りを変えて切削主分力、送り分力および背分力を調べた。

Fig. 2 はそれらの結果の一例を示す。すべての被削材について、切削抵抗の切削速度および送り依存性は通常の鋼を切削したときに見られる結果と何ら変わらない。そのなかで、YS 材と YA 材の差について着目すると、常に YS 材の切削主分力が YA 材のそれより 5% 程度小さい値となつている。この傾向は切削送り分力および背分力に関しても変わらない。また、切り込みを 0.2 mm に減じて上と同様の実験を行つたが、切削抵抗の測定結果は同じ傾向であつた。すなわち、S を著しく減じても、切削抵抗は大幅には増加しない。

脱硫鋼の切削抵抗が通常鋼よりも大きいのは、S を減じたことによる脱硫鋼の属性、すなわち、硫化物系介在物の減少にともない、延性が改善されたことに起因すると思われるが硫化物系介在物の大幅な減少割合に対し、切削抵抗の増加は僅少である。

3.3 工具摩耗

一定の切削条件で各被削材を旋削したときのフランク摩耗進行曲線の一例を Fig. 3 に示す。この図にみられるように、工具摩耗は YS 材を削つたときよりも YA 材を削つたときの方が少し大きくなつている。切削速度を変えて、フランク摩耗およびクレータ摩耗の進行を調べたところ、常に YS 材より YA 材において工具摩耗

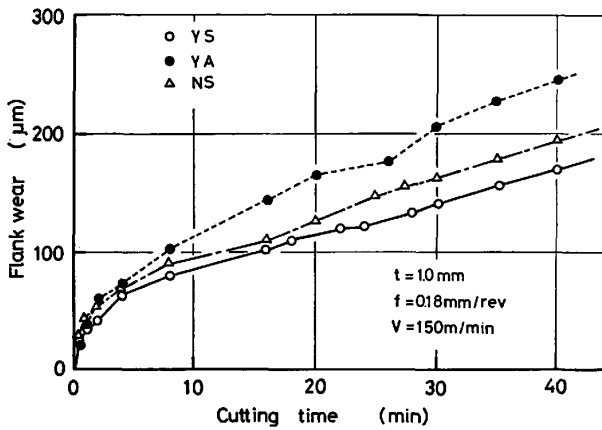


Fig. 3. An example of the flank wear curves ($t=1.0$ mm, $V=150$ m/min, $f=0.18$ mm/rev).

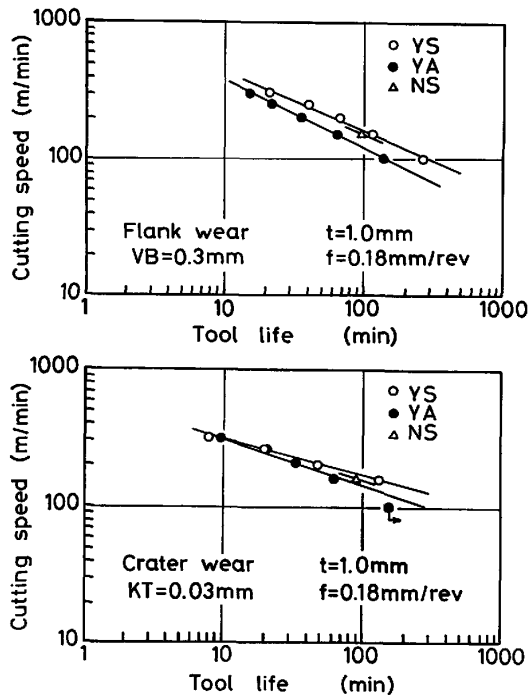


Fig. 4. The V-T curves of desulfurized and ordinary SCM 420 H steel, determined by the wear criterion on the flank and crater for 0.3 and 0.03 mm, respectively.

が若干大きいことが認められた。これらの結果をまとめて V-T 線図で示すと Fig. 4 のようになる。

3-4 切りくずの破碎性

切りくずの切れやすさを評価するために、いろいろな切り込みと送り条件で各被削材を旋削し、得られた切りくずの形態を分類して Fig. 5 に示す。切りくずの形態分類は中山ら⁹⁾の手法にもとづいた。Fig. 5 において斜線を施した線より上の領域では切りくずが連続しないで切断し、下の領域では切りくずが連続して発生することを示す。一般にこの限界線が左下方にあればあるほど、小さい切り込み、小さい送りでも切りくずが切れることを示すので切りくず破碎性が良いとみなせる。3種の被

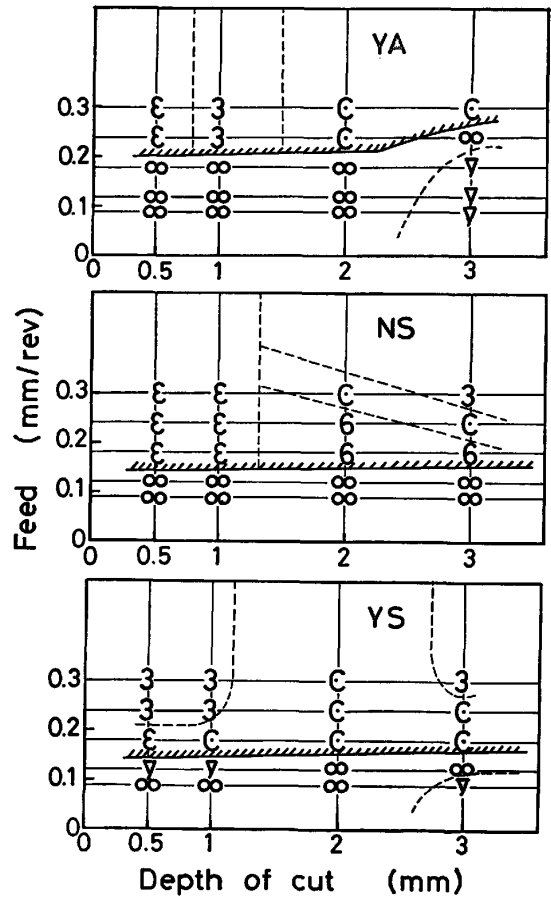


Fig. 5. Morphology of machined chip of work materials ($V=150$ m/min).

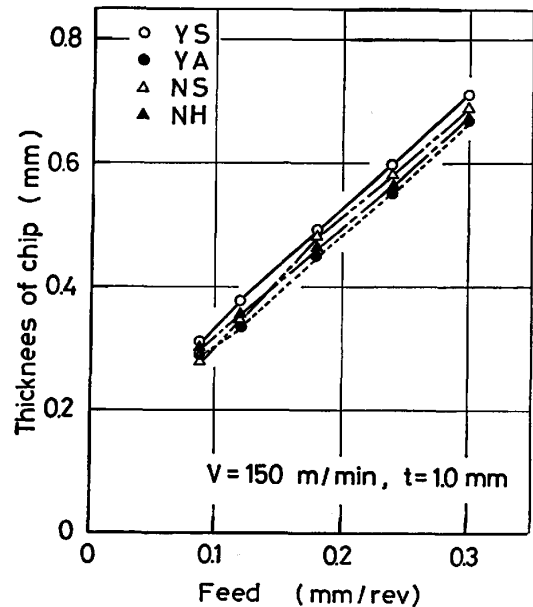


Fig. 6. Chip thickness of work materials ($t=1.0$ mm, $V=150$ m/min, $f=0.18$ mm/rev).

削材を比較すると、切りくず破碎性が最も悪いのは YA 材であり、つぎに NS 材が悪く、YS 材が最も良い。チップブレーカーをつけているのでその差はあまり大きく

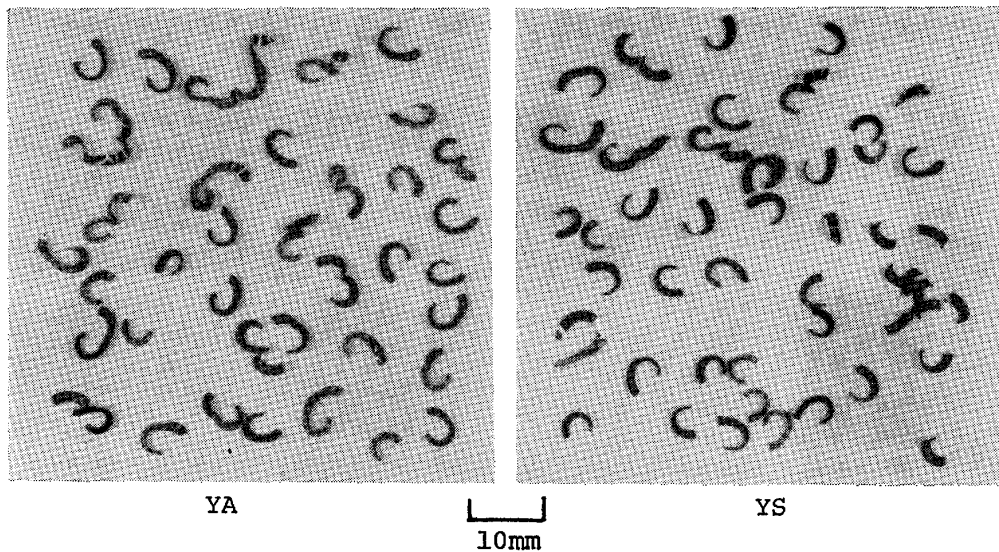


Photo. 1. Photographs of chips, showing similar chip formation between desulfurized and ordinary SCM 420 H steels under the given cutting condition as shown in Table 6.

Table 6. Tool wears of desulfurized and ordinary SCM 420 H steel under the condition of a suitable chip-breaking. (μ)

Steels	Side relief face		End relief face		Rake face
	VB	VN	VB	VN	KT
YA	236	336	116	246	21.0
YS	207	341	170	240	22.5

Cutting conditions : P20 (-6, -6, 6, 6, 15, 15, 0.8), $V=250$ m/min, $f=0.18$ mm/rev, $t=1.0$ mm, Cutting time 8 min, chip breaker width 1.5 mm, dry.

あらわれていないが、それでも切り込みが 3 mm 程度に大きいときは YA 材において切りくずがかなり切れにくいことがわかる。

YA 材の切りくずが切れにくい原因の一つは、Fig. 6 に示すように YA 材の方が YS 材より薄い切りくずを発生させるからである。すでに述べたように被削性に及ぼす脱硫の影響は小さく、実用切削上あまり問題はない程度と判断される。しかし、同一の切削条件で通常鋼では切りくずが切断するが脱硫鋼では連続して発生するような場合は実際上問題となる。そこで、一定の切削条件の下で、チップブレーカ幅のみを調整してほぼ同じ形態の切りくずが発生する (Photo. 1) ようにして、工具の摩耗を調べた。Table 6 はそのような条件での超硬工具 P20 (-6, -6, 6, 6, 15, 15, 0.8) の摩耗を示す。この結果によれば、横切刃のフランク摩耗はやはり YS 材より YA 材を削った場合の方が大きい、クレータ摩耗や境界摩耗は両者の間にあまり差がない。したがって、切りくず形態を制御して適当に折れるようにした実用の切削加工条件でも脱硫鋼の切削は十分行えるといえよう。

3.5 考 察

3.5.1 仕上げ面あらさ

通常の鋼に S を 0.1~0.3% 添加すると、MnS の増加によつて、低切削速度域では刃先より前方での被削材の破壊が軽減されるために仕上げ面あらさが改善され¹⁰⁾¹¹⁾、高切削速度域では構成刃先の消滅する限界切削速度¹²⁾が高くなるために仕上げ面が悪くなる¹⁰⁾ことが知られている。また、臨界切削速度は、構成刃先の核があつても成長しないような切削速度で、見かけ上は限界切削速度と一致する¹⁰⁾¹²⁾¹³⁾。本実験では、通常の鋼から脱硫して S 量を 1 桁程度減じたとき、仕上げ面あらさに及ぼす S の効果を調べたところ、実験の範囲内で 2 つの鋼の間に臨界切削速度の差を見出すことはできなかつたが、仕上げ面あらさに及ぼす S の効果は従来のものと同じ傾向であつた。すなわち、脱硫鋼に対し、通常鋼を S 添加鋼とみなすことによつて、従来の結果および改善機構を適用することができる。

Photo. 2 は昌運カズヌーブ旋盤を用いて超硬工具 P20 (-6, -6, 6, 6, 15, 15, 0.8) で、YA および YS 材を旋削した仕上げ面の SEM 写真で、仕上げ面の幾何学的品位を比較したものの代表的な例を示す。それによると、低速での仕上げ面はいずれの鋼材とも材料が破壊した面で構成された粗い面となつている。一方高速での仕上げ面は YA 材において工具の通過面が非常に滑らかな面であるのに対し、YS 材においては微小なむしれや凹みが多量に混在する面となつている。後者は、通常鋼の S の含有量がわずか 0.031% であつても、脱硫鋼の 0.002%S に比べると、S 含有の効果があらわれて脱硫

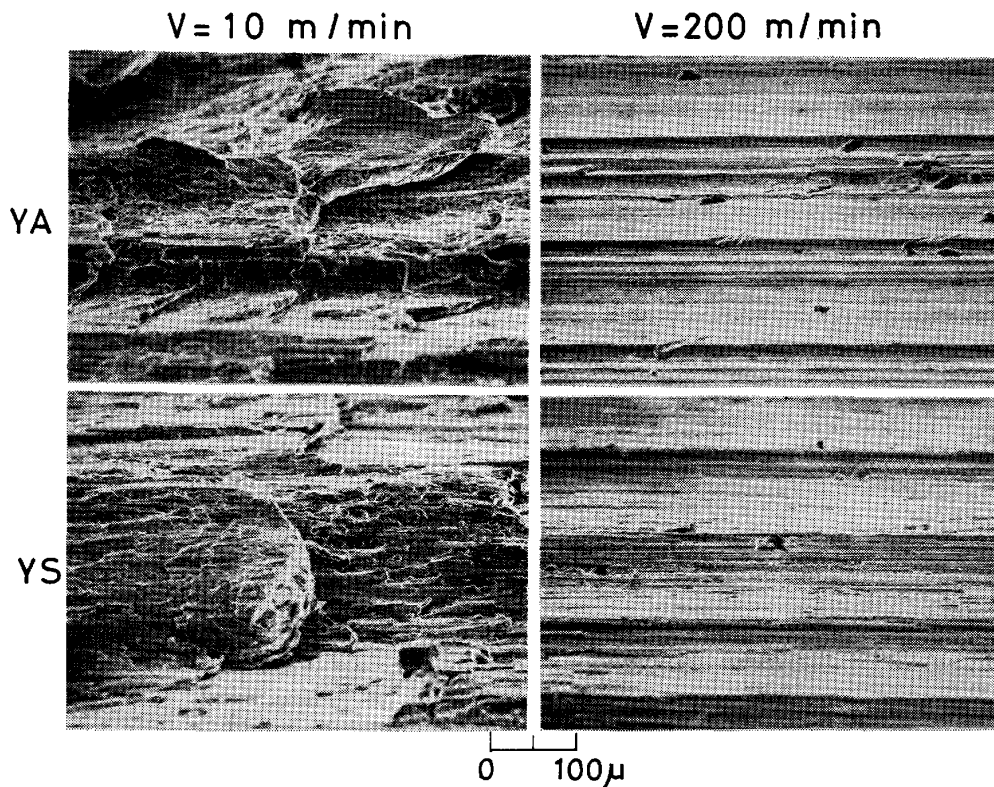


Photo. 2. Topography of machined surface (P20 (-6, -6, 6, 6, 15, 15, 0.8), $t=2.0$ mm, $f=0.12$ mm/rev).

鋼より工具逃げ面に微小な構成刃先様のもの（マイクロチップ）¹⁴⁾¹⁵⁾ が高速域まで発生しやすいためと考えられた。このマイクロチップは、逃げ面下に流れこむ金属が工具逃げ面の微小凸部によつてせきとめられ、その上に堆積することによつて生成される¹⁶⁾¹⁷⁾。これはみぞ状の凹みや微小なむしれの発生をよく説明する機構である。仕上げ面に微小な凹みが発生する過程としては、*N. P. SUH*¹⁸⁾ が唱えた金属摩擦におけるデラミネーション説があげられる。これによれば、仕上げ面が工具逃げ面で押しつけられながらすべり摩擦をうけるとき、表面下でクラックが発生し成長して薄片状の摩耗粉が形成され、そのあとに凹みができると考えられる。マイクロチップによる説も、デラミネーションによる説も微小な破壊の起点となるものが何か問題である。*D. GILLIBRAND*¹⁹⁾ は第2相を含まない純鉄と第2相としてパーライトを含む0.35%炭素鋼をP20工具で旋削し、仕上げ面を走査電子顕微鏡で調べて、表面の微小なむしれ、凹み、穴やマイクロクラックは第2相の存在によつてひきおこされると結論した。脱硫鋼と通常鋼の仕上げ面の差をみると、パーライトが存在すること以外に非金属介在物の存在がこれらの仕上げ面トポグラフィに影響することが考えられ、通常鋼の仕上げ面に見られる微小な欠陥は硫化物のためであると考えられる。

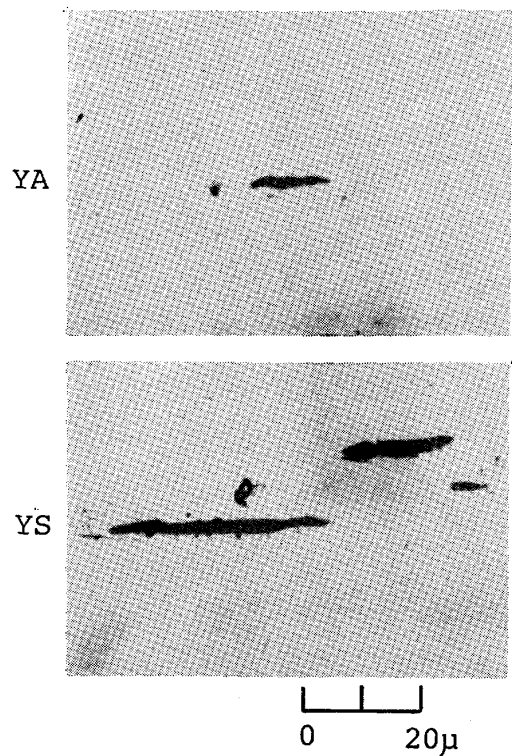


Photo. 3. Morphology of type A inclusions.

3.5.2 A系介在物の影響

Photo. 3 に YA 材と YS 材の A 系介在物の代表的

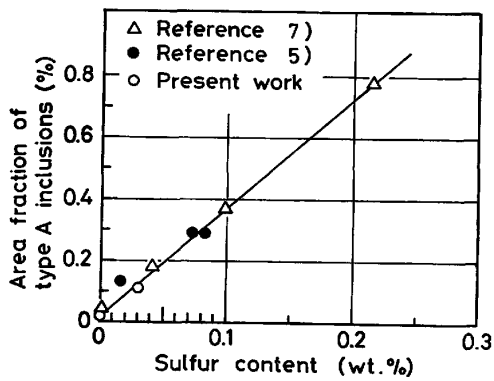


Fig. 7. Relation between area fraction of type A inclusions and sulfur contents.

な顕微鏡写真を示す。YA 材のそれは YS 材に比べて長さが半分ほどの約 25 μ 程度のものが多いが、形態そのものはほぼ相似形である。A系介在物の存在量を調べると、Fig. 7 に示すとおり、A系介在物の面積率と S 量はほぼ直線関係にある。S の低減によつて工具寿命および切りくずの破碎性からみた被削性が劣化するのは、A系介在物が小さくなることとその量が低減することの2つに原因があると思われる。

S は通常、鋼中で MnS となつて存在し、鍛伸や圧延によつて A 系介在物になる。S を添加することによつて被削性が改善される機構には、1) MnS が第 2 次せん断領域で潤滑材として働き、摩擦抵抗を下げるため²⁰⁾、2) 内部切り欠きとして働き、せん断変形と破壊を容易にするため¹¹⁾¹⁵⁾²¹⁾²²⁾、の 2 説がある。ところが一般的に、S 添加鋼の被削性は MnS の形を大きくしたり、ひも状から紡錘状に変えると改善されることや、超硬工具

のクレータ摩耗痕上に MnS があまり観察されないこと^{24)~26)}によつて、1) よりも 2) の機構が主に働いていると考えられる。本実験では S 量を低減したとき被削性の変化を調べたところ、すでに考察した仕上げ面あらさを除いて、被削性が劣化したが、その機構は上に述べた 2) の説と何ら変わるところがないといえる。すなわち、脱硫されて、MnS が小型になる結果内部切り欠き作用が弱まり、その絶対量が少なくなる結果応力集中のサイトが減少して、被削性が劣化する効果を生じたと考えられる。その程度が従来の S 添加鋼に比べどのくらいであるかを、工具摩耗について検討した。Fig. 8 は SCM 22 鋼を超硬工具で旋削して工具寿命に及ぼす S 添加の影響を調査した山本・熊谷²⁷⁾の結果および SCM 21 鋼の被削性を調査した精機学会切削性専門委員会の共同研究⁸⁾の結果と本実験の結果を比較したものである。ここで切削条件が若干異なるので直接比較することはできないが、その傾向を把握することができる。すなわち、本研究の工具寿命 (VB=0.3 mm 基準) に及ぼす S 低減の効果は従来得られている S 添加の効果を外挿して予測される程度よりも小さいといえる。S 含有量の低減はこのように工具寿命を減じるが、その程度はあまり大きくないので、重大な問題を生じることなく切削加工が行えると考えられる。また、この鋼種の被削性全般について、熱処理の影響²⁾⁵⁾や冷間加工の影響²⁸⁾を調べた結果と本実験の脱硫の影響を調べた結果を比較すると、被削性が悪化または改善される程度は脱硫の影響の方が小さいか同程度であり、この面からも実用の生産的加工が克服できると結論づけられる。なお、脱硫鋼は切削仕上げ面のト

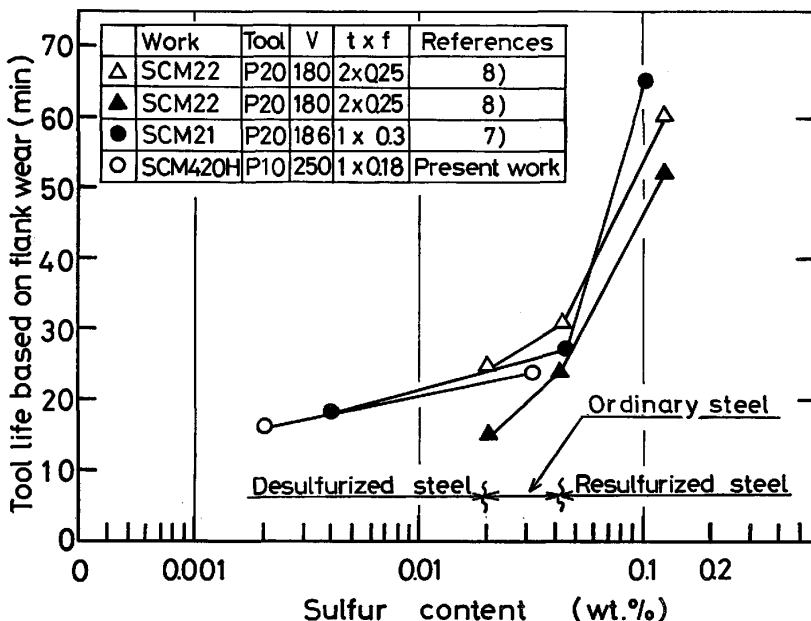


Fig. 8. Effect of sulfur contents on the flank wear.

ライボロジーからみた改善が大きいので、今後この見地からこの鋼種の積極的な利用が望まれる。

4. 結 言

被削性に及ぼす極低Sの影響を調べるため、SCM 420 Hの脱硫鋼(0.002%S)と通常鋼(0.031%S)の超硬工具による旋削実験を行った結果、S含有量を低減すると被削性は次のように変わることが判明した。

1) 臨界切削速度以上の切削仕上げ面のトポグラフィが異なり、仕上げ面あらさは小さくなる。

2) 切削抵抗はいく分大きくなり、工具寿命は短くなるがその程度は小さい。

3) 切りくずは薄くなり、破碎性が悪化する。

これらの結果を総合的にみると、脱硫鋼は切削条件を適当に選択することによつて、實際上重大な問題を生じることなく生産的加工ができると判断され、その際、切削仕上げ面の品位が改善され、トライボロジカルな効果が期待できる。なお、鋼の被削性に及ぼす脱硫の効果と硫黄添加の効果を考察して、それらの機構の間には何ら差がないことを示した。

文 献

- 1) たとえば、赤瀬繁之、赤沢正久、権藤 永：鉄と鋼，66 (1980)，p. 662
- 2) T. ARAKI, H. FUKUNAGA, T. SATA, and N. NARUTAKI: Influence of Metallurgy on Machinability of Steels, ASM, No. 7 (1975), p. 381
- 3) 山本俊郎、熊谷憲一：応用機械工学 (1974-4)，p. 80
- 4) 石原康正：日本金属学会会報，6 (1967) 3，p. 188
- 5) 精機学会切削加工専門委員会：精機学会切削加工専門委員会被削性小委員会研究報告，第2編 (昭和54年4月)，p. 27

- 6) たとえば、竹山秀彦、大野幸彦、宮坂金佳：精密機械，33 (1967) 10，p. 652
- 7) 熊谷憲一：東京大学学位論文，(1976)，p. 133
- 8) 精機学会切削性専門委員会：精密機械，39 (1973) 8，p. 809
- 9) 中山一雄：精密機械，42 (1976) 2，p. 74
- 10) M.C. SHAW and J.A. COLWELL: 機械と工具，9 (1965) 3，p. 47，(1964 CIRP 報告訳，仕上切削)
- 11) 白井英治：機械試験所報告，(1961-8) 43，p. 1
- 12) 奥島啓式、岩田一明、中谷征司：日本機械学会論文集，31 (1965) 225，p. 847
- 13) 竹山秀彦、大野幸彦：精密機械，34 (1968) 8，p. 537
- 14) 中山一雄：精密機械，40 (1974) 3，p. 269
- 15) A.W.J. CHISHOLM, W.J. WILBER, and E.J. PATTINSON: Ann. CIRP, 21 (1972) 1, p. 7
- 16) K. NAKAYAMA, M.C. SHAW, and R. C. BREWER: Ann. CIRP, 14 (1966), p. 211
- 17) P. LANDHERER and J.H. ZAAT: Wear, 27 (1974), p. 129
- 18) N.P. SUH: Wear, 25 (1973), p. 111
- 19) D. GILLIBRAND: Precision Eng., 1 (1979) 2, p. 89
- 20) M.E. MERCHANT and N. ZLITIN: Trans. ASM, 41 (1949), p. 647
- 21) J. HAZRA, D. CAFFARRELLI, and S. RAMALINGAM; Trans. ASME, B97 (1974), p. 1230
- 22) 荒木 透、山本重男：精密機械，42 (1976) 2，p. 68
- 23) T. ITOH, S. ABEYAMA, A. KIMURA, and S. NAKAMURA: Int. Symp. on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, ISIJ/ASM (1977), p. 313
- 24) 丸山益輝、福永秀春：広島大学工学部研究報告，22 (1973) 1，p. 53
- 25) 精機学会切削性専門委員会：精密機械，37 (1971) 5，p. 331
- 26) H. FUKUNAGA and M. MARUYAMA: Int. Symp. on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, ISIJ/ASM (1977), p. 241