

論 文

鋼の脱酸調整による介在物組成変化と被削性*

田阪 興**・赤沢正久**・片山 昌***・黒岩和也**

Effect of Deoxidation on Nonmetallic Inclusions in Steel and the Machinability

Kou TASAKA, Tadahisa AKASAWA,
Sakae KATAYAMA, and Kazuya KUROIWA

Synopsis:

The machinability of a specially deoxidized free-cutting steel both in turning and drilling has been studied in comparison with that of ordinary steels and leaded steels, for the purpose of clarifying the relations between the machinability of steels and their nonmetallic inclusions.

The tool life, for turning the specially deoxidized free-cutting steel with carbide or ceramic tools is definitely longer than that of an ordinary or leaded free-cutting steel, apparently because of the effect of the oxide layer formed on the tool face. The composition of this oxide layer is similar to that of the oxide inclusion in the steel, being comprised of SiO_2 , CaO and Al_2O_3 . As this layer apparently impedes the physical and chemical reactions that may otherwise take place between the tool and the steel chip, and, furthermore, apparently acting as a kind of lubricant, the tool life is exceedingly improved.

With a high-speed steel tool, however, such difference in tool life has hardly been noticeable in respect of the said three types of steels, and, furthermore no oxide layer has been noted to form on the tool face even when turning the specially deoxidized free-cutting steel.

The drill life was found to be remarkably improved and the work resistance was greatly lowered with increase in the sulfur content of the steel. This favorable effect of sulfur content has been more salient in the specially deoxidized free-cutting steel having an high oxygen content than in the case of ordinary steels.

(Received Feb. 27, 1971)

1. 緒 言

鋼中に含有されている非金属介在物の性状が鋼材の被削性に大きな影響をおよぼすことは、硫黄快削鋼については古くから知られている¹⁾²⁾。さらに比較的最近になって行なわれた研究の結果^{3)~16)}、普通鋼でも非金属介在物とりわけ酸化物系介在物が、被削性に大きな影響をおよぼすことが明らかになってきた。

このような研究の結果、いわゆる快削性元素を添加しなくても、FeSi あるいは CaSi 合金を用いて脱酸¹⁶⁾、非金属介在物の性状を調整することによつて、被削性を向上させることが判明した。この種の快削鋼（以下には脱酸調整快削鋼と称する）は、従来の快削鋼に見られるような機械的性質の劣化がないこと、また酸化物系付着物による被削性改善という新しい快削機構が各種の鋼に適用可能と考えられるため、注目を集めている。

本報は、非金属介在物と被削性の関係を明らかにする

目的で、主として CaSi 脱酸で製造した脱酸調整快削鋼と通常脱酸鋼 (FeSi+Al 脱酸鋼) および鉛快削鋼の旋削性を比較検討し、さらに旋削と並んで重要な切削加工法である穴あけ加工時の被削性と脱酸法および S 含有量の関連を調査したものである。また工具付着物による快削機構についても若干検討した。

2. 供 試 鋼

供試鋼は、機械構造用炭素鋼 S45C 相当鋼であり、鉛快削鋼以外はいずれも実用の LD 転炉で溶製し、下注造塊した。Table 1 に供試鋼の化学組成、脱酸法およびドリル試験に使用した試験片の表面硬度を示す。○は真

* 昭和44年10月、45年3月、10月本会講演大会にて発表

昭和46年2月27日受付

** 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所

*** 新日本製鉄(株)本社

Table 1. Chemical composition and hardness of experimental steels.

Type of steel	Specimen	Deoxidizer	Chemical composition (%)									Hardness (Hb)	
			C	Si	Mn	P	S	Sol. Al	Ca	Pb	O	Q.T.*	N**
Specially deoxidized steel	A 1	CaSi	0.46	0.28	0.77	0.016	0.020	0.004	0.005	—	0.009	—	—
	A 2		0.44	0.29	0.85	0.019	0.021	0.006	0.004	—	0.010	—	—
	A 3		0.45	0.22	0.85	0.016	0.013	0.005	0.009	—	0.008	242	198
	A 4		0.44	0.29	0.77	0.014	0.026	0.006	0.006	—	0.012	248	193
	A 5		0.45	0.29	0.79	0.017	0.046	0.004	0.005	—	0.008	248	194
Leaded steel	B 1	FeSi+Al	0.46	0.26	0.73	0.014	0.022	0.025	<0.001	0.17	0.003	—	—
Ordinary steel	C 1	FeSi+Al	0.46	0.28	0.80	0.018	0.016	0.022	<0.001	—	0.002	—	—
	C 2		0.47	0.23	0.83	0.014	0.017	0.024	<0.001	—	0.003	249	199
	C 3		0.46	0.26	0.84	0.015	0.033	0.023	<0.001	—	0.003	246	195
	C 4		0.47	0.26	0.82	0.017	0.051	0.022	<0.001	—	0.003	247	196

* Quenched and tempered, ** Normalized

空溶融法（溶融最高温度 1850°C）、Ca は原子吸光法で分析し、その他の元素は JIS 法に準拠して分析した。

Table 1 の試料 A1 ~ A5 は CaSi 合金（JIS G 2314 1号）を用いて脱酸した脱酸調整快削鋼であり、試料 B1 は比較のための鉛快削鋼で、市販材である。試料 C1 C4 は普通の機械構造用炭素鋼 S45C であり、FeSi 合金（JIS G 2302 2号）と金属 Al で脱酸してある。ただし、試料 C3, C4 は試料 C2 と同一ヒートで、造塊時に FeS を添加し、S 含有量を高めたものであり、試料 C4 では S が機械構造用炭素鋼の JIS 規格（JIS G 4051）を満足していない。なお転炉溶製材の Cu, Ni, Cr, Sn および As は各試料共に、Cu: <0.07%, Ni: <0.04%, Cr: <0.04%, Sn: <0.01% および As: <0.02% であり、試料による相違はほとんどない。鉛快削鋼 B1 は Cu, Ni, Cr がそれぞれ 0.13%, 0.15%, 0.13% であり、転炉溶製材より高くなっている。また Table 1 から明らかのように、脱酸調整快削鋼の組成は通常鋼とほとんど相違ないが、O 含有量が高く、sol. Al が低く、CaSi 合金で脱酸したので Ca が若干高い点が異なっている。

旋削試験片は、鋼塊を 96 mm 角に熱間圧延後直径 96 mm、長さ 600 mm に切削加工し、870°C × 60 min 空冷の焼ならしをおこなって作製した。ドリル試験片は 96 mm 角鋼より 96 × 75 × 400 mm³ の試験片素材を切出し、所定の熱処理後、表面 2.5 mm 切削して作製した。その熱処理は焼入焼もどし（870°C × 90 min-空冷、850°C × 90 min-油冷、550°C × 90 min-水冷）および焼ならし（870°C × 90 min-空冷）である。

3. 試験方法

3.1 旋削試験方法

旋削試験は無段変速機を内蔵した 15HP の高速旋盤でおこなった。寿命試験に使用した工具は、超硬合金工具 P20 (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8)、セラミック工具 (-5, -5, 5, 5, 15, 15, 1.2) および高速度鋼工具 SKH4A (-5, 15, 5, 5, 60, 30, 0.8) の三種であり、工具による寿命試験値のバラツキを少なくするため、いずれも同一ロットで製作したものである。切削抵抗の測定には、高速度鋼工具は寿命試験と同一形状の工具を使用した。超硬合金工具は凝二次元切削とするため (0, 6, 6, 6, 8, 0, 0.5) なる形状の P20 を用いた。

切削条件のうち、送りおよび切込みはそれぞれ 0.25 mm/rev, 2.0 mm の一定とした。切削油は超硬合金工

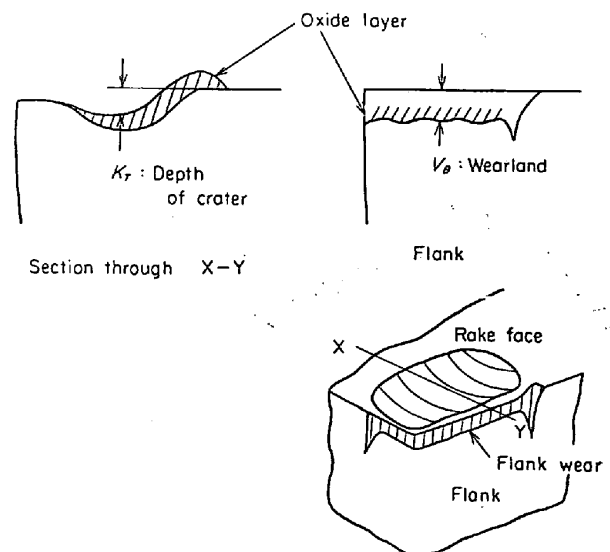


Fig. 1. Specific data for defining the tool wear when cutting specially deoxidized steel.

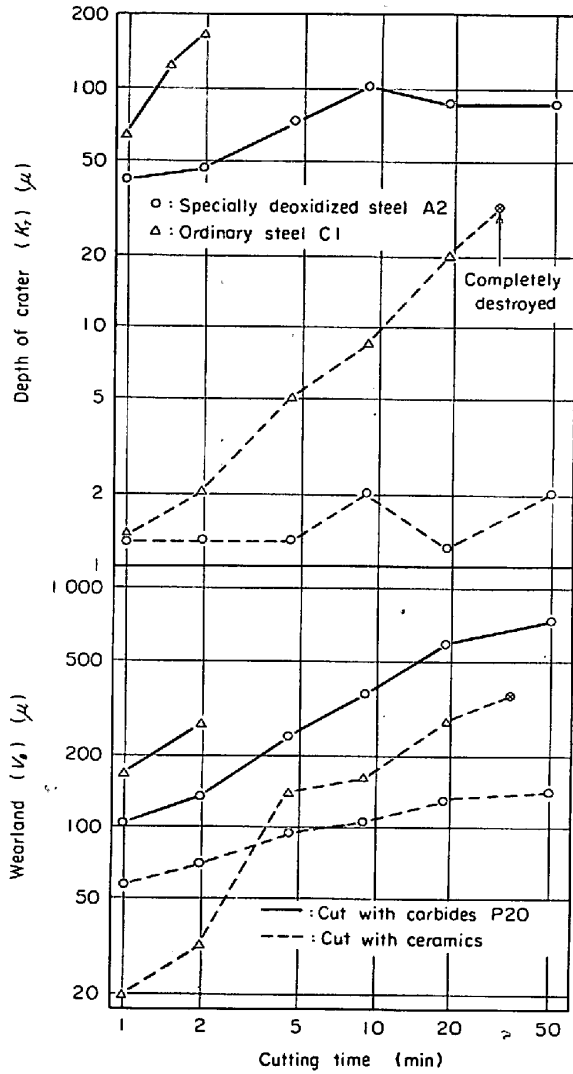


Fig. 2. Variation of tool wear with cutting time. Cutting speed : 300m/min.

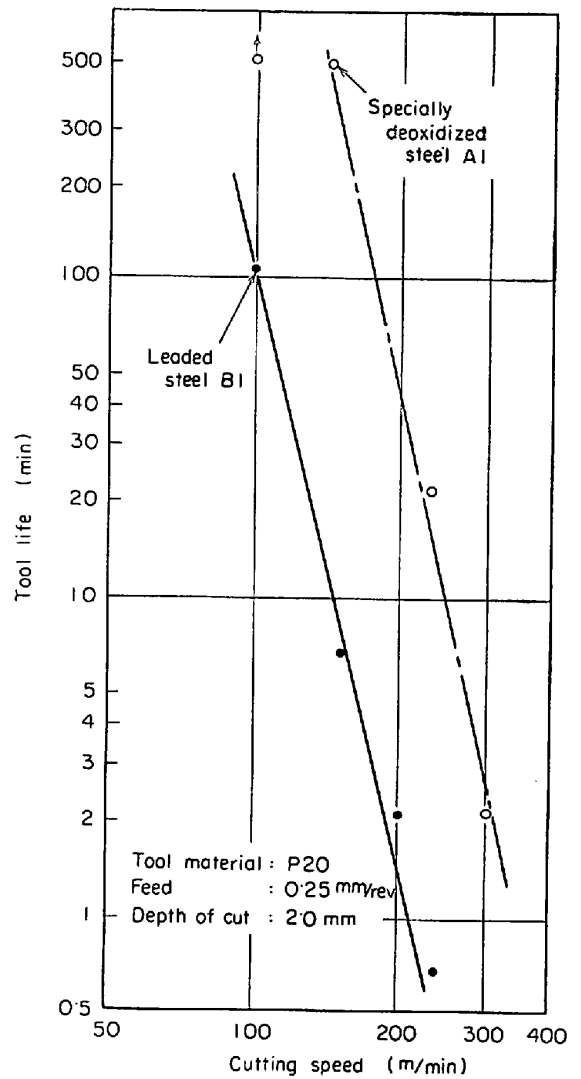


Fig. 3. Tool life curves for carbide tools when cutting specially deoxidized and leaded steels.

具とセラミック工具では使用しなかつたが、高速度鋼工具の場合は #60 スピンドル油を約 2 l/min 用いた。切削速度は 50~300m/min の範囲内で工具材種の適性にあわせて決定した。

工具摩耗の測定は、工具顕微鏡を用いて測定した。脱酸調整快削鋼の工具摩耗は、Fig. 1 のように付着物のある状態で測定した見掛けの摩耗量であり、クレーター摩耗 K_T は真の摩耗より若干小さく、フランク摩耗 V_B は大きく測定されている¹⁷⁾。なお付着物のある状態で摩耗を測定したのは、付着物を除去した場合、さらに切削を継続するとき、付着物除去による工具摩耗の増加が懸念されたためである。

切削抵抗の測定は、抵抗線歪ゲージを利用した工具動力計を用いておこなつた。各分力の相互干渉は 3% 以下である。

3-2 穴あけ試験方法

穴あけ試験は、無段変速機を内蔵した 3 HP のボール盤を使用しておこなつた。試験ドリルは、直径 10 mm、材質 SKH9、ねじれ角 30°、心厚 2 mm、先端角 135° ± 30'、逃げ角 10° ± 30'、チゼル角 130° ± 5° であり、先端諸角度は工具顕微鏡で全数検査した。切削条件は次に示すとおりである。

切削速度 : 5~40m/min

送り : 0.33 mm/rev

切削油 : #60 スピンドル油, 約 2 l/min

穴深さ : 30 mm のめくら穴

工具の寿命は、ドリルが完全に損傷し切削不可能になつた時点とし、その判定は、切削動力の急上昇および音の変化でおこなつた。なお寿命は、切削総長さすなわち穴深さ×個数の値 (mm) で表示した。

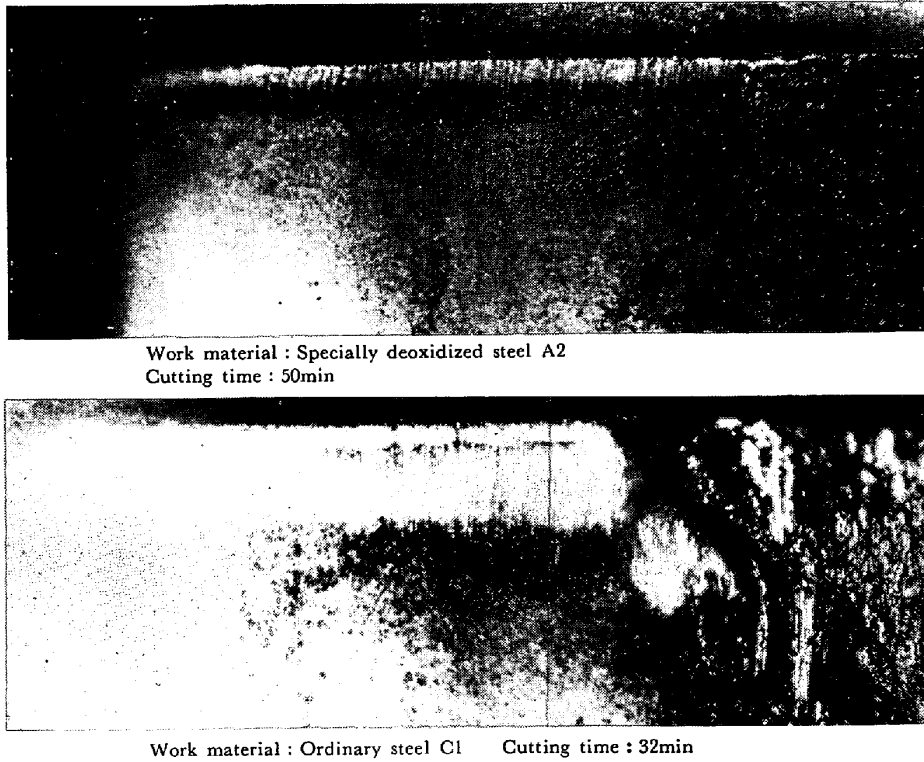


Photo. 1. Wearlands of ceramics when cutting specially deoxidized and ordinary steels 300 m/min.

切削抵抗は、抵抗線歪ゲージを利用した工具動力計を用いて、トルクおよびスラストを同時に求めた。

4. 試験結果および考察

4.1 旋削加工性

4.1.1 工具寿命

Fig. 2 に、脱酸調整快削鋼 A2 および通常鋼 C1 を超合金工具 P20 およびセラミック工具を使用し、切削速度 300m/min で外周旋削した場合の工具摩耗曲線を示す。脱酸調整快削鋼は、セラミック工具と超合金工具 P20 のいずれの場合にも、通常鋼に比較し、工具摩耗が著しく少ない。W. KÖNIG⁷⁾ はセラミック工具で脱酸調整快削鋼を切削した場合、切削時間が長いと欠損がおこり、激しく摩耗すると報告している。しかし、本研究の結果では、Photo. 1 のセラミック工具の逃げ面摩耗状況から明らかのように、通常鋼を切削した場合は、境界摩耗の発達が激しく、切削時間 32 min で境界摩耗部に欠損を生じたが、脱酸調整快削鋼では切削時間 50 min でも平均摩耗と境界摩耗ともに小さく、欠損も生じていない。

Fig. 3 に、脱酸調整快削鋼 A1 および鉛快削鋼 B1 を超合金工具 P20 で旋削した場合の工具寿命曲線を示す。寿命基準は、クレーター摩耗 $K_T=50\mu$ とした。脱酸調整快削鋼は鉛快削鋼に比較し、工具寿命が著しく

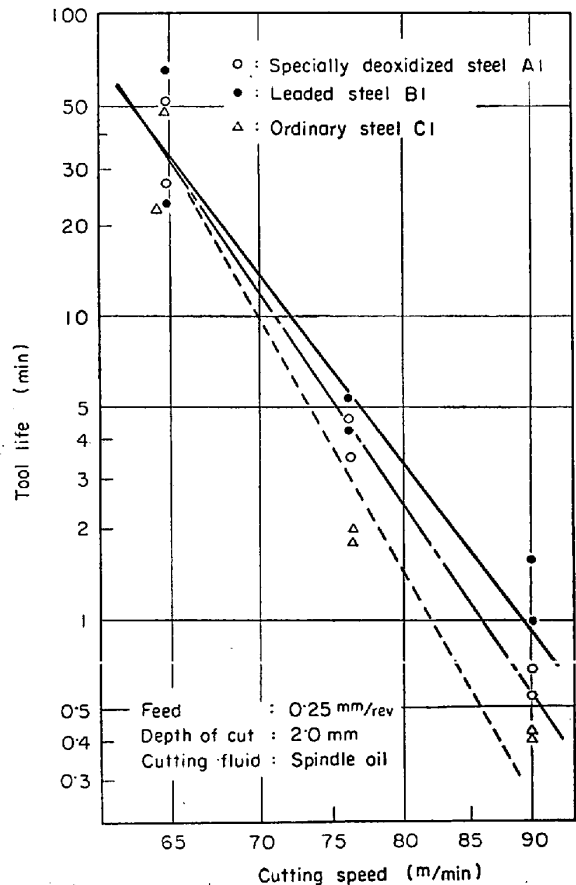


Fig. 4. Tool life curves for high speed steel tools when cutting specially deoxidized, leaded, and ordinary steels.

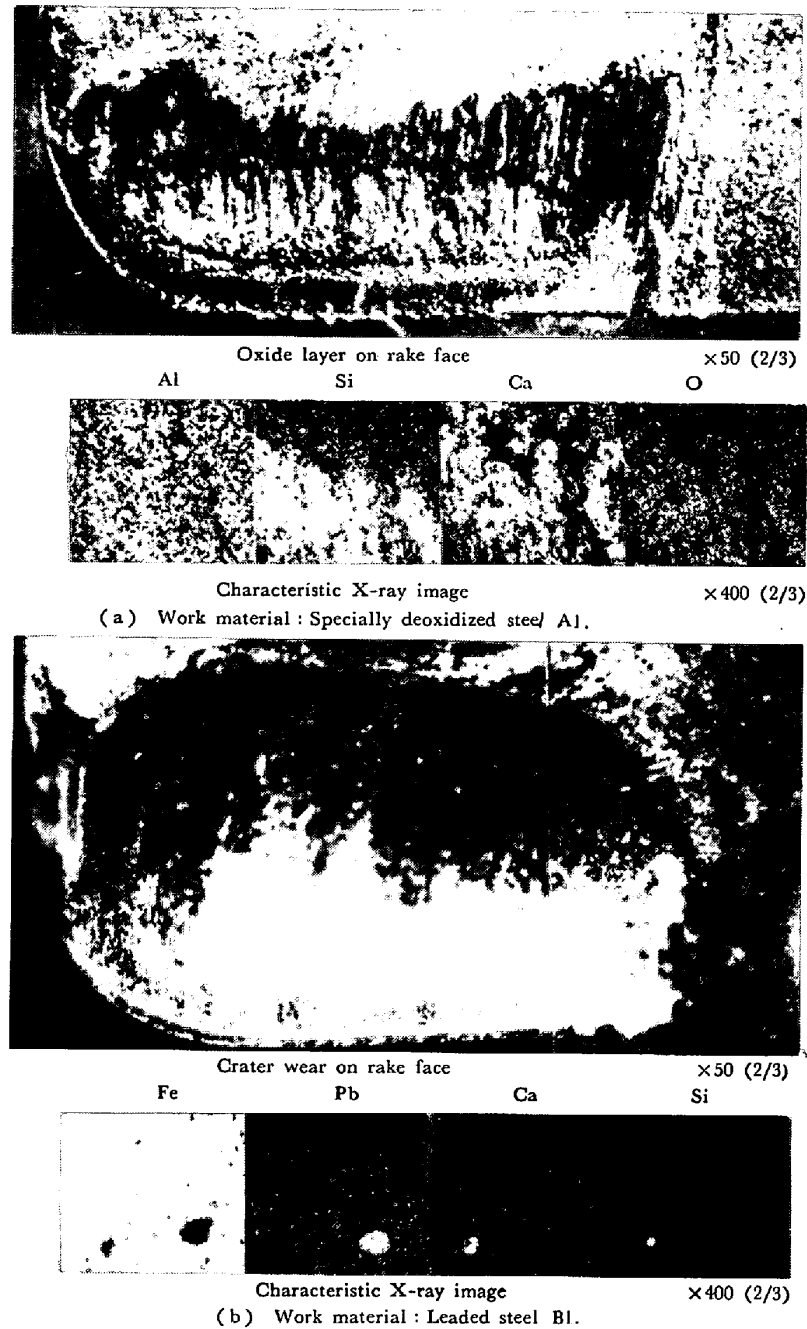


Photo. 2. Appearances of rake faces of carbide tool P20 cutting specially deoxidized and leaded steels at 150 m/min for 40 min.

優れている。たとえば切削速度 150m/min で比較すると、鉛快削鋼の工具寿命はわずか7 min 程度であるのに対して、脱酸調整快削鋼は約 500 min であり、70 倍強も工具寿命が長い。これは脱酸調整快削鋼ではPhoto. 2 (a)に示したように、工具刃先面に工具保護効果を有する Al, Si, Ca などの酸化物からなる付着物が生成されたのに対して、鉛快削鋼 (Photo. 2 (b)) では 100m/min以上の比較的高切削速度であるために、工具と切屑界面で潤滑作用をする¹⁸⁾鉛皮膜がほとんど生成しないためであろう。

Fig. 4 は高速度鋼工具 SKH4A で旋削した場合の脱酸調整快削鋼 A1, 鉛快削鋼 B1 および通常鋼 C1 の工具寿命曲線を示す。寿命基準は、工具の完全損傷とした。切削速度 90, 76m/min の場合、通常鋼が最も劣り、鉛快削鋼が脱酸調整快削鋼よりわずかにすぐれているが、三鋼種の相違はあまり大きくない。しかも 65m/minでは、通常鋼、脱酸調整快削鋼および鉛快削鋼の優劣は判定しがたい。鉛快削鋼は鉛の潤滑作用のために切削温度が低下する反面、工具切屑接触長さが短く、刃先近くにクレーター摩耗を生じる。本試験は完全損傷を寿

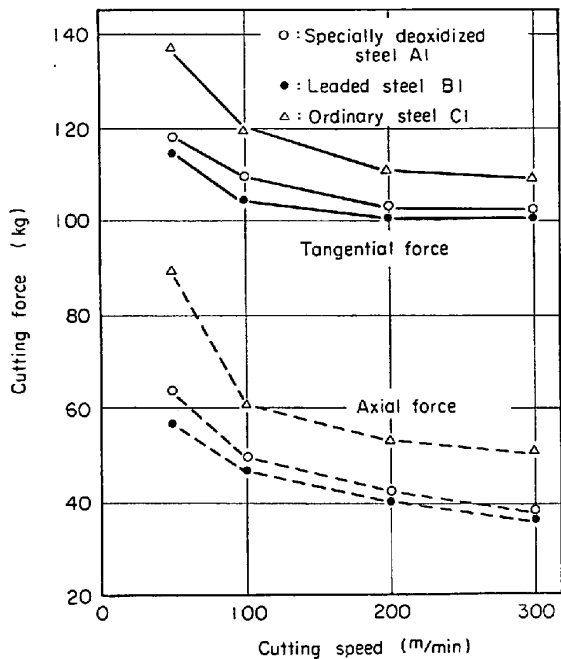


Fig. 5. Variation of cutting forces with speed. Cutting tool : P20 (0, 6, 6, 6, 8, 0, 0.5)

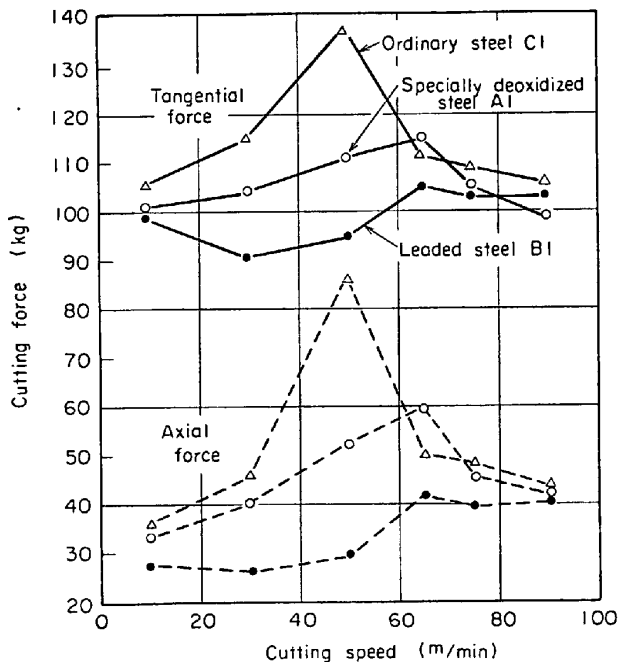


Fig. 6. Variation of cutting forces with speed. Cutting tool : High speed steel SKH4A (-5, 15, 5, 5, 60, 30, 0.8)

命基準としたために、クレーター摩耗が刃先近くに生じる負の作用が大きく寄与し、鉛快削鋼と通常鋼の工具寿命の相違があまりなかつたものと考えられる。なお H. HOFF¹⁹⁾ らも中炭素鋼では鉛快削鋼と通常鋼の工具寿命はほぼ同等であると報告している。

4.1.2 切削抵抗

超硬合金工具 P20 で、脱酸調整快削鋼 A1 と鉛快削

鋼 B1 および 通常鋼 C1 を旋削した場合の切削初期(切削時間 30 sec)における切削抵抗を Fig. 5 に示す。脱酸調整快削鋼の切削抵抗は、主分力と送り分力共に通常鋼よりかなり低く、鉛快削鋼よりわずかに高い程度である。

Fig. 6 は、脱酸調整快削鋼 A1、鉛快削鋼 B1 および 通常鋼 C1 を高速度鋼工具 SKH4A で切削した場合の切削抵抗を示す。切削速度 50m/min より低切削速度の場合は、通常鋼、脱酸調整快削鋼、鉛快削鋼の順に切削抵抗は低くなっているが、高切削速度領域では、三鋼種の相違はあまり認められない。脱酸による介在物組成変化が、切削抵抗におよぼす影響を明らかにするためには、付着物のほかに構成刃先もふくめて、切削機構の面からさらに検討する必要がある。

4.2 穴あけ加工性

4.2.1 工具寿命

S含有量をわずかに高めることによつて、ドリル寿命は向上する²⁰⁾。S含有量が比較的低い場合、脱酸によるドリル寿命の相違はほとんどないが²¹⁾、硫化物の性状は脱酸法によつて異なるため²²⁾ S含有量が高い場合には、

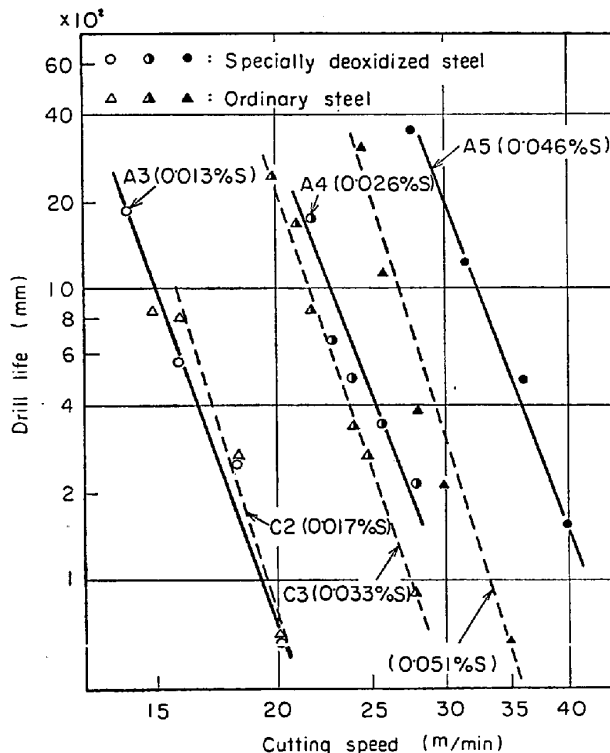


Fig. 7. Drill life curves for specially deoxidized steels and ordinary steels having various sulfur contents.

Heat treatment of work material : Quenched and Tempered. Cutting tool : High speed steel SKH 9, 10mmφ Feed : 0.3mm/rev Cutting fluid : Spindle oil.

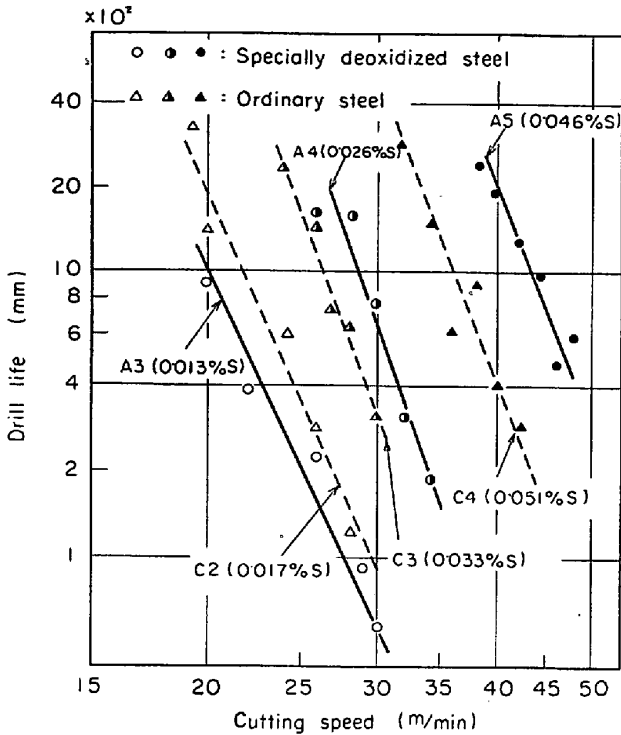


Fig. 8. Drill life curves for normalized specially deoxidized steels and ordinary steels having various sulfur contents. Cutting tool: High speed steel SKH9, 10 mm φ Feed : 0.33 mm/rev Cutting fluid : Spindle oil.

ドリル寿命が脱酸法によつて異なる可能性がある。そこでSと脱酸調整の複合効果により穴あけ加工性を改善することを目的として、S含有量の異なる脱酸調整快削鋼について、穴あけ加工性を調査した。Fig. 7, Fig. 8に脱酸調整快削鋼 A3, A4, A5 および通常鋼 C2, C3, C4 について、焼入焼もどしと焼ならし状態でのドリル寿命曲線を示す。脱酸調整快削鋼および通常鋼ともにS含有量が若干高くなるとドリル寿命は大幅に向上する。このようなS添加の効果は、脱酸調整快削鋼の方がより大きく、S含有量の高いところでは、脱酸調整快削鋼のドリル寿命は、通常鋼に比較し優れている。たとえば快削鋼 A5 (0.046% S) と通常鋼 C4 (0.051% S) の焼入れ焼もどし状態のものを、切削速度 30m/min で比較してみると、切削総長さは試料 A5 で約 2000 mm, 試料 C4 で約 300 mm であり、快削鋼 A5 は通常鋼 C4 より S 含有量が若干低いにもかかわらず約 7 倍もドリル寿命が長い。

4.2.2 切削抵抗

Fig. 9 に焼入焼もどし状態の脱酸調整快削鋼 A3, A4, A5 および通常鋼 C2, C3, C4 を穴あけした場合の切削抵抗の速度変化を示す。切削トルクは、S含有

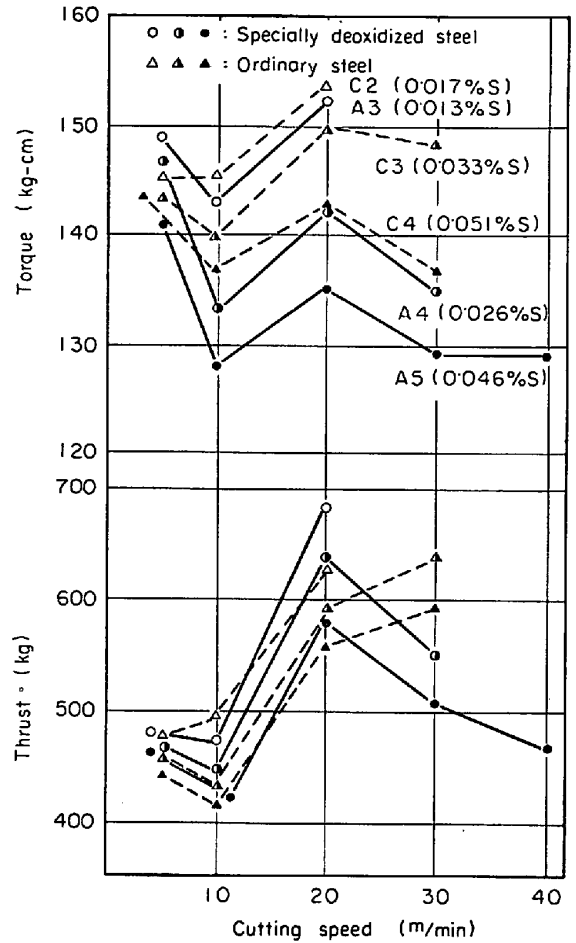


Fig. 9. Variation of drilling forces vs. cutting speed when cutting specially deoxidized steels and ordinary steels having various sulfur contents. Heat treatment of work material : Quenched and tempered Cutting tool: High speed steel SKH9, 10 mm φ Feed : 0.33 mm/rev Cutting fluid : Spindle oil

量の少ない脱酸調整快削鋼 A3 と通常鋼 C2 では同等である。また、S含有量が高くなると両鋼種ともに切削トルクは低下する。この低下の度合は、ドリル寿命の場合と同様、脱酸調整快削鋼のほうが、通常鋼より大きい。このためS含有量が高くなると、脱酸調整快削鋼の切削

Table 2. The shape of sulfide inclusions in billets of specially deoxidized and ordinary steels.

Type of steel	S contents (%)	Length of sulfide L (μ)	Width of sulfide W (μ)	L/W
Specially deoxidized steel	0.013	36.8	4.2	8.3
	0.026	53.8	5.7	9.2
	0.046	55.4	6.4	8.4
Ordinary steel	0.017	32.9	3.1	10.8
	0.033	48.2	4.3	11.6
	0.051	49.2	4.7	10.2

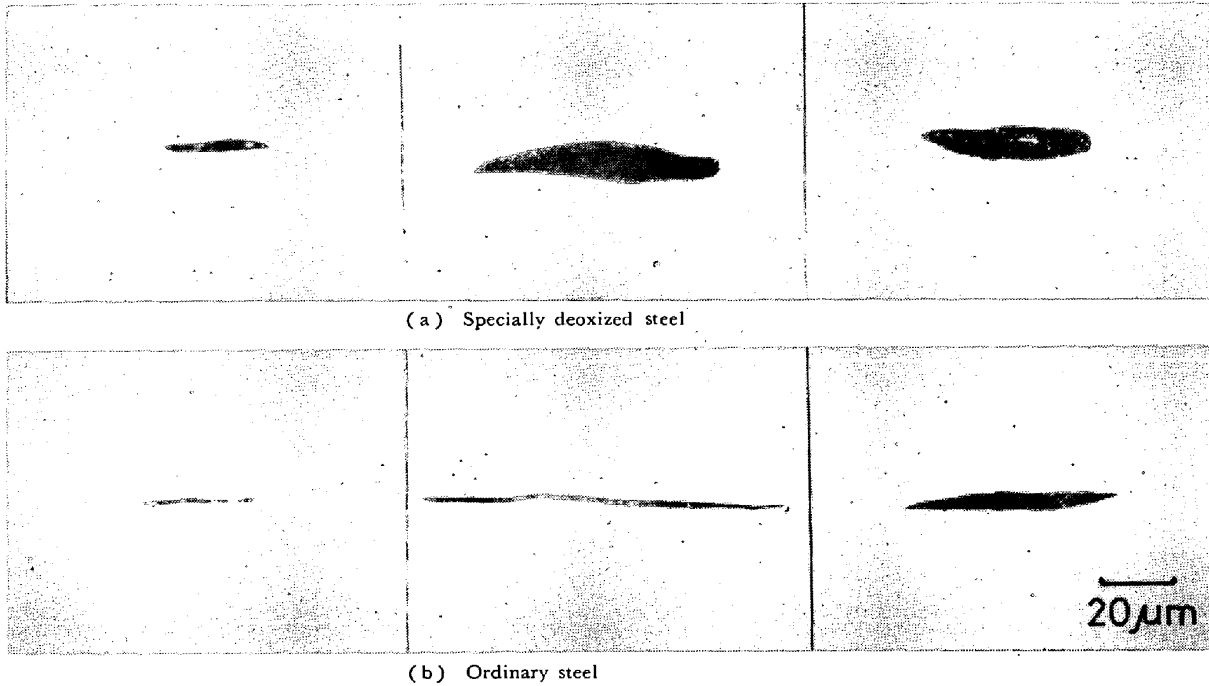


Photo. 3. Sulfide inclusions in billets of specially deoxidized and ordinary steels.

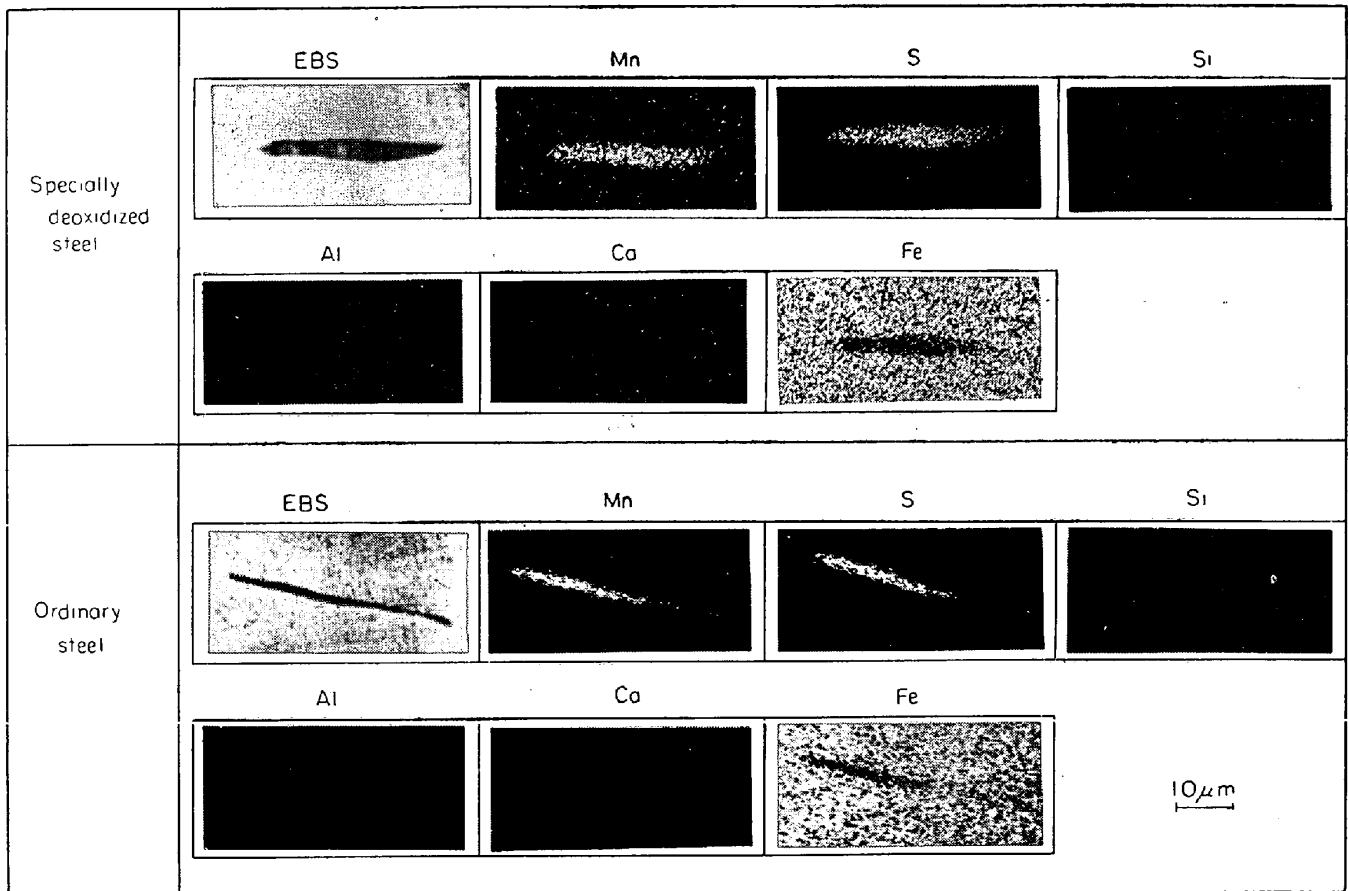


Photo. 4. Characteristic X-ray image of sulfide inclusions in specially deoxidized and ordinary steels.

トルクは、通常鋼のそれより低くなる。なお切削トルクは、切削速度 10m/min で極小、20m/min で極大になっている。このような切削トルクの切削速度変化は構成刃先の影響によるものであろう²³⁾。

切削スラストは、切削トルクの場合と異なり、Sの影響は脱酸調整快削鋼と通常鋼と同程度であり、S含有量が高くなつても相違はほとんど認められない。しかし、切削速度 30m/min では通常鋼 C3, C4 に比較し、脱酸調整快削鋼 A4, A5 の切削スラストは若干低くなっている。

4.2.3 ドリル寿命におよぼす硫化物系介在物の影響

S含有量が比較的低い場合、脱酸調整快削鋼と通常鋼のドリル寿命が同等であることは、圧延状態の試料についても確認しており²¹⁾、脱酸により生成した非金属介在物は、ドリル寿命にあまり影響していない。しかし SiO₂, Al₂O₃ など比較的かたい酸化物系介在物は、若干ドリル寿命を劣化させる²¹⁾。

S含有量が高くなるとともにドリル寿命は大幅に向上するが、これは硫化物系介在物の切欠効果のために切削エネルギーが減少し、切削温度が低下するためであろう¹⁸⁾。また、このSの効果が、脱酸調整快削鋼のほうで通常鋼より大きいのは脱酸法は直接にはドリル寿命に影響しないが、硫化物系介在物の性状を変化させ、間接的にドリル寿命に影響しているためであると考えられる。

Photo. 3 は、通常の工程で熱間圧延した 96 mm 角の試験片素材での脱酸調整快削鋼および通常鋼の代表的な硫化物系介在物を示しており、Table 2 は、これら硫化物系介在物の形状を示している。なおTable 2 の値は各試料ともに 30 個の硫化物について、長さおよび幅を測定したその平均値である。また硫化物の長さ (L) / (硫化物の幅 (W)) も個々の硫化物について求めた L/W の平均値である。

Photo. 3 および Table 2 から明らかのように、脱酸調整快削鋼の硫化物は、通常鋼のそれに比較し若干大きく、しかも硫化物長さ (L) / 硫化物幅 (W) は小さい。

一般に L/W の小さいほど、すなわち楕円形状に近いほど被削性が優れているといわれている¹⁾²²⁾²⁴⁾。このことから Fig. 7, Fig. 8 に示したように、鋼種によりドリル寿命に対するSの効果が異なる原因は、次のように考えられる。すなわち、S含有量が低い場合、ドリル寿命は被削材のかたさなど機械的性質に左右され²¹⁾、硫化物の形態の相違によるドリル寿命の差は認められないが、S含有量が高くなると共に硫化物の寄与率が高くなり、ドリル寿命は硫化物の形態に大きく影響されるようになる。脱酸調整快削鋼の硫化物は、大きくかつ楕円形状に

近いために、S含有量の高い場合、脱酸調整快削鋼のドリル寿命が通常鋼よりよくなったのであろう。

なお Table 2 に示した鋼種による硫化物形状の相違は、鋼中 [O] 含有量の相違²²⁾²⁴⁾、MnS 中に存在する酸化物の差²⁵⁾あるいは CaS の有無などに起因する硫化物の塑性加工性の差によるものと考えられる。この点を明らかにするため、硫化物組成のX線イメージによる調査を試みたが、その一例を Photo. 4 に示すように、いずれも典型的な MnS であり、Ca, Si, Al, Fe などは検出限度より低く確認できなかつた。

4.3 脱酸調整快削鋼の工具付着物と快削機構

4.3.1 工具付着物

Photo. 5 に脱酸調整快削鋼 A2 をセラミック工具と超硬合金工具を用い、切削速度 300m/min で切削した場合の付着物を示す。セラミック工具および超硬合金工具の場合ともに、切削開始 1 min ですでに数 μ の付着物が生成している。

Table 3 に Photo. 5 の付着物表面をX線マイクロアナライザーにより点分析し、Birks の補正を加えて求めた付着物の組成を示す。

付着物は主として Al₂O₃, SiO₂, CaO の複合酸化物であり、他に若干の MnO が認められた。またこの付着物相のほかに Fe および MnS が混在している場合がある¹⁷⁾。なお LD 転炉で溶製した数十チャージの CaSi 脱酸快削鋼を超硬およびセラミック工具を使用し、50~300 m/min で切削したとき生成する付着物は、Fig. 10 に示したようにアノサイト (anorthite)、ゲーレンナイト (gehlenite)、ないしコランダム (corundum) の組成であり、Table 3 に示した付着物組成もこの領域内にある。

FeSi 脱酸鋼でも、Al 添加量を少なくし、sol. Al : 0.010 以下、O : 0.005~0.012 程度にすると、切削時工具付着物が生成し、工具寿命は CaSi 脱酸鋼と同程度にすぐれている¹⁶⁾、その付着物組成は、Fig. 11 に示したように約 45% SiO₂-35% Al₂O₃-30% MnO であり、

Table 3. Compositions of oxide layer when cutting specially deoxidized steel A2 at 300m/min.

Tool	Composition		
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO
Ceramics	38.8	21.7	25.4
Carbides	32.4	29.3	32.0

Acc. voltage : 20 kV
Sample current : 0.01 μA
X-ray spot : 2 μ

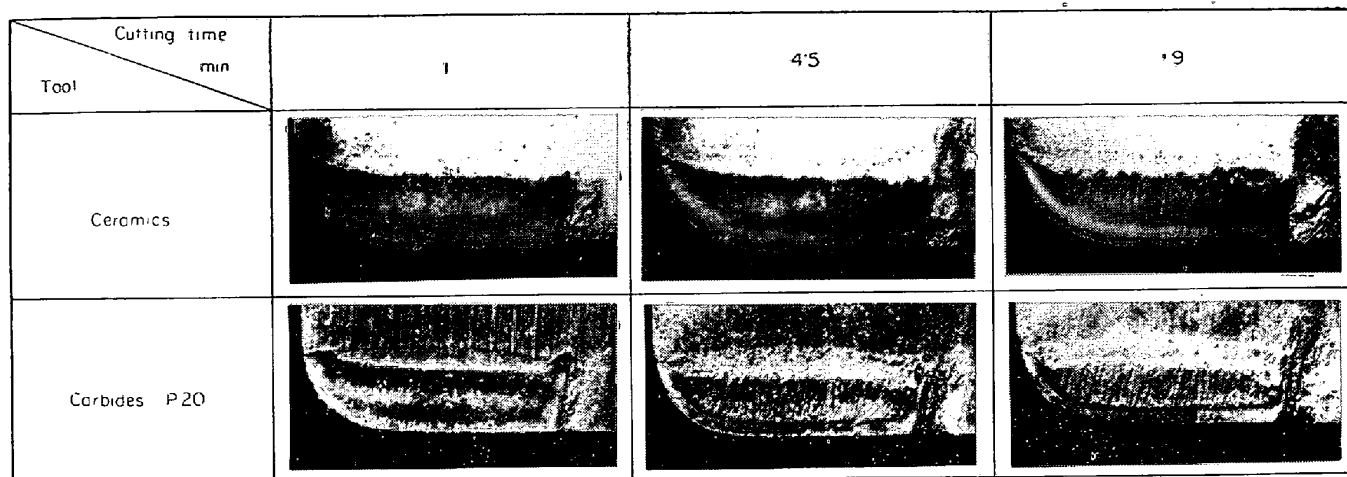


Photo. 5. Variation of oxide layers on rake faces with time when cutting specially deoxidized steel A2 with ceramics and carbides P20 at 300 m/min.

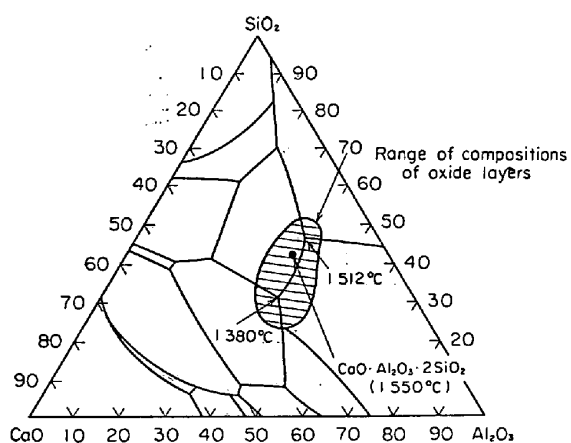


Fig. 10. Range of compositions of oxide layers formed on tool faces when cutting CaSi deoxidized steels.

CaO はほとんど認められない。

このように、FeSi 脱酸鋼と CaSi 脱酸鋼で付着物組成が著しく異なるにもかかわらず、その被削性がある切削条件の範囲では同等である¹⁶⁾ところから、酸化物付着物は生成しさえすれば、その組成によらず同様の工具保護効果を有していると考えられる。

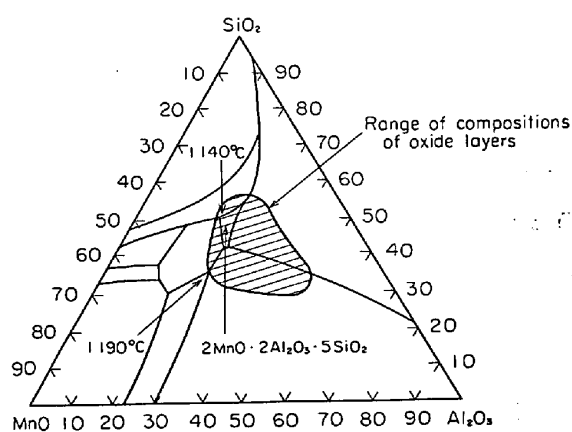
また、脱酸調整快削鋼を高速鋼工具で旋削および穴あけした場合には、付着物は認められなかった。

4.3.2 脱酸調整快削鋼の快削機構

工具の摩耗機構は大別すると次の三つに分類される。

- (1) 化学的摩耗…化学反応，拡散などによる工具の変質，弱体化
- (2) 機械的摩耗…チップングあるいはアブレーション摩耗
- (3) 溶着または凝着物の脱落による摩耗

脱酸調整快削鋼を切削した工具には、Photo. 6 に示し



Example of FeSi deoxidized steel¹⁶⁾

C	Si	Mn	P	S	sol. Al	Ca	O	N
0.46	0.32	0.90	0.020	0.018	0.005	<0.001	0.0050	0.0049

Fig. 11. Range of compositions of oxide layers formed on tool faces when cutting FeSi deoxidized steels.

たような付着物が、切屑離脱点近くは比較的厚く、刃先全面をおおっている。しかもこの付着物は、切削開始数秒後からは常に認められ、付着物表面の一部は切屑あるいは被削材と共に流出しても、構成刃先のように大きな脱落はないと考えられる。このように、脱酸調整快削鋼を切削した場合は、付着物が工具刃先面を常におおっており、工具と切屑または被削材との接触をさまたげている。したがって、アブレーション作用による機械的な摩耗や、奥島²⁶⁾が指摘したように拡散摩耗が減少しよう。この両摩耗の減少が脱酸調整による工具摩耗減少の主因であろうが、さらに付着物の工具切屑界面における潤滑作用も考えられる。Table 4 に Fig. 5 の切削抵抗測定

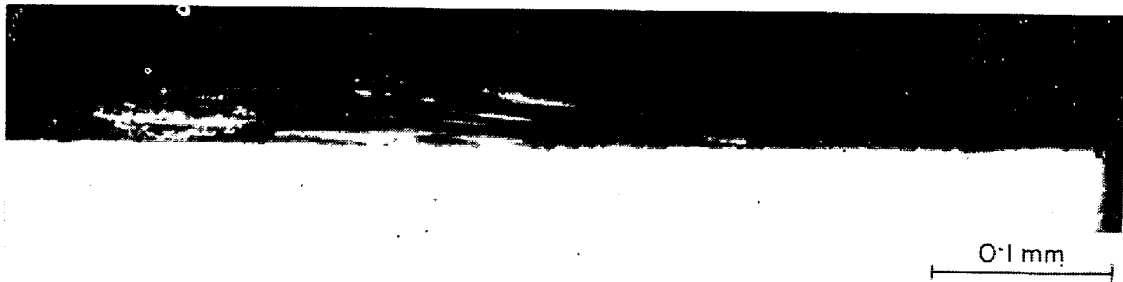


Photo. 6. Section of oxide layer when cutting specially deoxidized steel A5 with carbides P20 at 150 m/min.

Table 4. Normal stress, frictional stress and apparent coefficient of friction on the rake face when cutting three types of steels with carbide tool P20 (0, 6, 6, 6, 8, 0, 0.5).

Specimen	Cutting speed m/min	P_H kg	P_V kg	a mm	α deg	σ_t kg/mm ²	τ_t kg/mm ²	μ
Specially deoxidized steel A4	50	119	64	1.1	6	50.7	34.6	0.68
	100	110	50	1.0	6	52.1	30.6	0.59
	200	103	41	1.0	6	49.1	25.8	0.53
Leaded steel B1	50	115	58	1.0	6	54.2	34.9	0.64
	100	105	48	1.0	6	49.7	29.4	0.59
	200	100	40	0.9	6	52.9	27.9	0.53
Ordinary steel C2	50	139	90	1.4	6	46.0	37.2	0.81
	100	120	61	1.1	6	51.4	33.3	0.65
	200	112	54	1.1	6	48.1	29.7	0.62

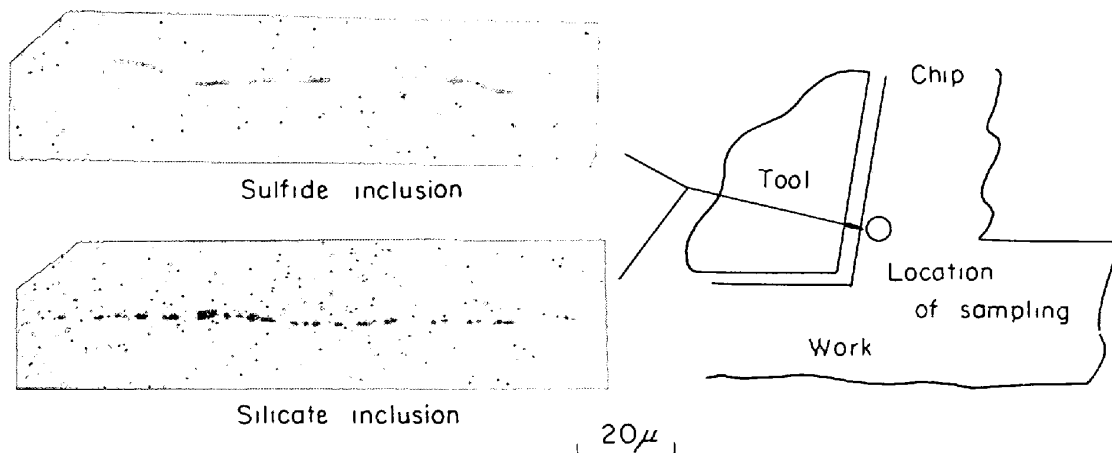


Photo. 7. Sulfide and silicate inclusions in chip when cutting specially deoxidized steel A5 with carbides P20 at 150 m/min.

結果から求めた, すくい面摩擦応力 τ_t , すくい面垂直応力 σ_t およびすくい面摩擦係数 μ の計算結果を示す. ここで τ_t , σ_t および μ は次式により計算した.

$$\tau_t = \frac{1}{ab} (P_H \sin \alpha + P_V \cos \alpha)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{ab} (P_H \cos \alpha - P_V \sin \alpha)$$

$$\mu = \frac{P_H \sin \alpha + P_V \cos \alpha}{P_H \cos \alpha - P_V \sin \alpha}$$

P_H : 切削抵抗主分力

P_V : 切削抵抗送り分力

α : すくい角 (6°)

a : 工具-切屑接触長さ

b : 切込み深さ (2 mm)

すくい面摩擦係数は潤滑作用を示す指標であり, 摩擦係数の小さいほど潤滑効果が大い. Table 4 から明らかかなように脱酸調整快削鋼は通常鋼に比較し, 摩擦係数 μ が著しく小さく, 鉛快削鋼より若干大きい程度であ

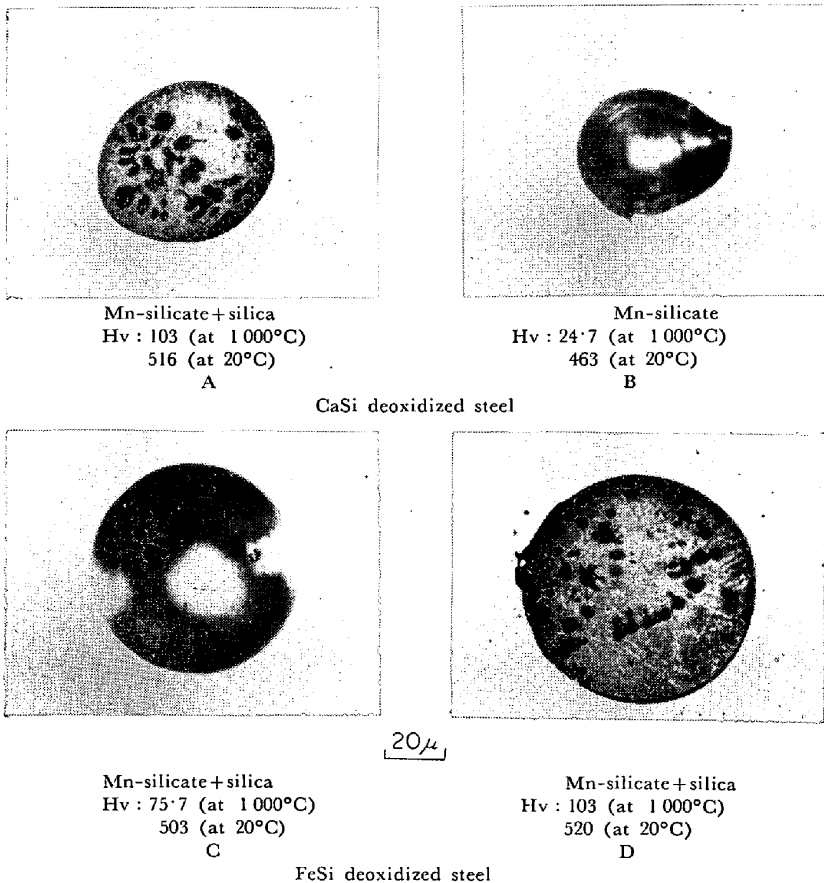


Photo. 8. Hardness of typical oxide inclusions found in 300 kg ingots of specially deoxidized steel.

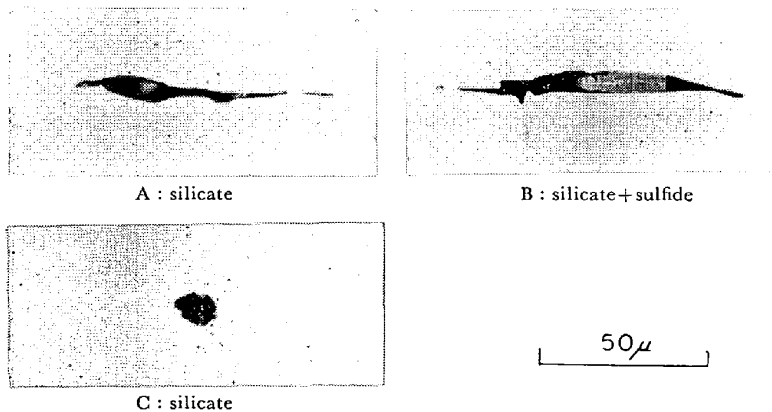


Photo. 9. Example of oxide inclusions in billets of specially deoxidized steel.

り、付着物による潤滑作用が認められる。

Photo. 7 は、脱酸調整快削鋼の切削断面における硫化物および酸化物の変形状態を示す。これは肉厚 2 mm の円筒型試験片を工具急速抜取装置にとりつけたすくい角 -10° の超合金工具 P20 を使用し、送り 0.25 mm/rev, 切削速度 150m/min で、切削中に工具を急速に抜取り、作製した切削断面試験片を、クロムメッキ後研磨して観察したものである。なお切削時間は、1.5 min

であり工具すくい面上には薄い付着物が認められた。Photo. 7 から明らかなように硫化物は E. M. TRENT²⁷⁾ らの報告と同様 Photo. 3 に示した状態より極端に細長く変形しているが、酸化物はいずれもあまり変形せず、点状に分断されていた。脱酸調整快削鋼中の熱間圧延により伸延した酸化物系介在物は、硫化物と同様内部潤滑により高速鋼工具での被削性も向上させるといわれている²⁸⁾が、上に述べたような硫化物と酸化物系介在物の切削中における変形状態の相違から、両者が同様の機構で被削性に寄与しているとは考えられない。

4.4 脱酸調整快削鋼の酸化物系介在物

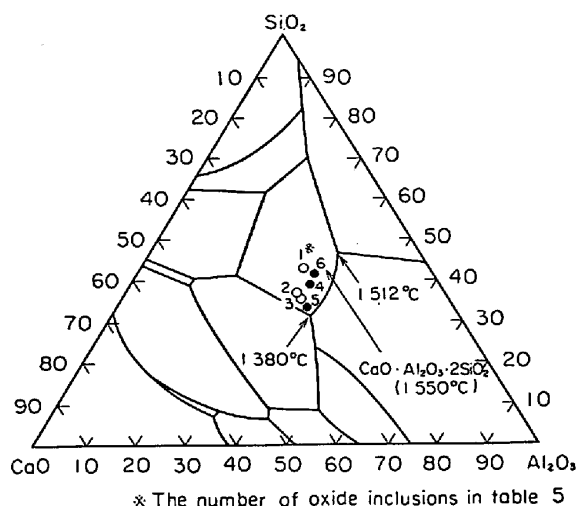
実験用 300 kg 高周波炉で溶製した CaSi および FeSi 脱酸鋼の鋼塊での酸化物系介在物のうち高温かたさの測定可能な比較的大きな介在物を選び、高温硬度を測定した。高温硬度は、高温微小硬度計を使用し、荷重 50 g で測定した。Photo. 8 に、その外観写真および測定結果を示す。Al₂O₃, CaO を固溶した Mn-シリケートである介在物 B は、1000°C でのかたさが 24.7 (kg/mm²) であり、これはすでに Table 4 に示した切削時のすくい面垂直応力より十分小さく、工具と切屑接触領域で塑性変形し、付着物となり得よう。しかし、介在物 A, D などの変形抵抗は、すくい面垂直応力よりはるかに高く、切削温度が 1000°C の場合は付着物になりえないと考えられる。しかし、超合金工具 P20 で高速切削する場合、切削温度は 1000°C 以上になるといわれており²⁹⁾、このような高速切削する場合には、付着物となる可能性がある。以上のように、脱酸調整快削鋼の酸化物系介在物は、種々の組成、高温かたさを有しているが、このために脱酸調整快削鋼

では 30~200m/min 以上と広い切削領域で切削速度によつて異なる付着物が生成し¹⁶⁾、被削性が優れているものと考えられる。

Photo. 9 は脱酸調整快削鋼の熱間圧延した 96 mm 角試験片素材での代表的な酸化物系介在物を示す。脱酸調整快削鋼の酸化系介在物はいずれの供試鋼でも大部分が熱間圧延により延びた Photo. 9 の介在物 A または硫化物と複合した介在物 B 型であり、ほかに球状で比較的小

Table 5. Compositions of silicate inclusions in specially deoxidized steels having different sulfur contents analyzed with EPMA.

Specimen	S contents	No	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CaO	FeO
A3	0.013	1	26.1	38.0	14.2	19.7	3.2
		2	27.5	32.5	13.9	26.7	12.6
		3	31.0	35.5	3.8	30.1	2.2
A5	0.046	4	34.6	40.4	0.3	20.6	2.9
		5	36.8	32.9	0.4	31.5	6.7
		6	36.0	42.8	1.3	20.1	2.6

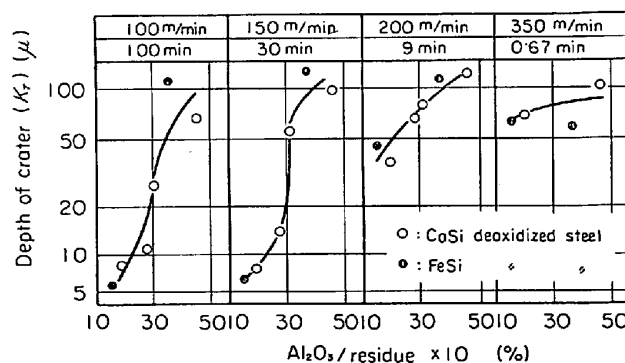
Fig. 12. Composition of oxide inclusions of specially deoxidized steels in CaO-Al₂O₃-SiO₂ diagram.

さい介在物Cが若干認められる。通常鋼では大部分アルミナであり、Photo. 9のようなシリケートは認められない。

Table 5は脱酸調整快削鋼 A3, A5の比較的大きな酸化物系介在物をX線マイクロアナライザーで分析した結果である。酸化物系介在物は、主としてCa, Al, Siの酸化物であり、他に若干のMnO, FeOが認められる。Fig. 12はこれら酸化物系介在物の組成を比較的少ないMnO, FeOを除外し、CaO-Al₂O₃-SiO₂三元状態図上に示したものである。酸化物系介在物は大部分アノーサイトの領域にあり、付着物はずでにFig. 10に示したように、アノーサイト、ゲーレンナイトないしコランダム組成であり、両者の組成はほぼ一致している。

FeSi脱酸鋼の場合も、鋼中酸化物系介在物の組成は、Fig. 11に示した工具付着物組成とほぼ一致し、CaSi脱酸鋼に多いCaOはほとんど認められなかつた。

このように付着物組成と、鋼中酸化物系介在物組成がほぼ一致しているところなどからも、すでに報告されているように⁷⁾、付着物は酸化物系介在物が可塑状態とな

Fig. 13. Influence of Al₂O₃ in steel on crater wear of carbide tool P20163.

つて生成されたものであることが明らかである。したがって付着物生成は酸化物系介在物の性状に影響されるが、とくにAl₂O₃の影響が大きい。

Fig. 13は非金属介在物中のAl₂O₃の割合と、クーター摩耗深さの関係を示したものであり、CaSi, FeSi脱酸鋼ともにAlを添加しAl₂O₃が多くなるにつれて付着物が生成しにくくなり、工具摩耗は大きくなる。このようにAl₂O₃が多くなると付着物が生成しにくくなるのは、結晶性のかたいアルミナが工具と切屑または被削材界面で塑性変形しないためと、酸化物系介在物の絶対量が減少するためであると考えられる。

AlのほかにS, Oも非金属介在物の性状を変化させ、工具付着物の生成傾向に影響する。Sは高切削速度領域での付着物生成傾向を強める¹⁷⁾。すなわちS含有量が0.02%以下である脱酸調整快削鋼では切削速度が約250 m/min以上になると付着物が生成しにくくなり、工具寿命が劣ってくる。しかし約0.04% S材では切削速度300 m/minでも約30 μ厚さの付着物が生成し工具摩耗は少ない。しかしこのSの効果の詳細な機構は明らかでない。

鋼中のΣOも多い方が工具付着物は生成しやすくなる。A. WICHERら¹¹⁾はO含有量と付着物生成頻度の関係を調査し、0.004% O以下では付着物はほとんど生成せず、Oが高くなると生成頻度は高くなるが、約0.01

%O以上になるとO含有量を増してもかわらなくなると報告している。著者らも CaSi 脱酸鋼をRH真空脱ガスし、O含有量を 0.004% 以下にした場合、付着物は生成しないことを確認した。このようにO含有量が低下すると付着物生成頻度が低下するのは付着物源である酸化物系介在物量が減少するためであると考えられる。

5. 結 論

機械構造用炭素鋼 S45C に相当する脱酸調整快削鋼の旋削加工特性を、鉛快削鋼および通常の機械構造用炭素鋼のそれと比較し、また鋼中酸化物系介在物と硫化物系介在物が旋削性と穴あけ加工性におよぼす影響を調査した結果次の諸点が明らかになった。

(1) 超硬合金工具 P20 による旋削加工では、脱酸調整快削鋼の工具寿命は通常鋼あるいは鉛快削鋼よりはるかに優れている。これは酸化物系介在物に起因する付着物の工具摩耗抑制効果のためである。なおセラミック工具で脱酸調整快削鋼を旋削する場合も、付着物が生成し、その工具寿命は、通常鋼よりも長い。

(2) 高速度鋼工具による旋削加工では、鋼種による工具寿命の差は認められない。酸化物系介在物の性状は影響しないものと考えられる。

(3) 脱酸調整快削鋼の旋削抵抗は、一般に通常鋼よりかなり低く、鉛快削鋼よりわずかに高い程度である。

(4) 穴あけ加工性を改善するにはSの添加が有効であるが、その効果は脱酸調整快削鋼のほうが通常鋼より大きい。この相違は、脱酸法により硫化物の形状が異なるためと考えられる。

(5) 穴あけ加工時の切削抵抗におよぼすS含有量の効果は、トルクでは寿命と同様であるが、スラストでは脱酸法による差は認められなかった。

(6) 超硬合金工具やセラミック工具で CaSi 脱酸の快削鋼を切削した場合、工具刃先に生成する酸化物系付着物は主として Al_2O_3 , SiO_2 , CaO の複合酸化物であり、鋼中の酸化物系介在物が刃先面の高温高圧下で塑性変形し凝着したものである。

(7) 付着物は、機械的摩耗や拡散摩耗を防止するほか工具と切屑界面での潤滑作用によつても工具寿命の向上に寄与している。

文 献

- 1) L. H. VAN VLACK: Trans. ASM, 45(1953), p. 741
- 2) E. J. PALIWODA: Trans. ASM, 50(1958), p. 258
- 3) W. ZIELONKOWSKI: Maschinenmarkt, 68(1962) 62, p. 135
- 4) H. OPITZ and W. KÖNIG: Arch. Eisenhüttenw., 33(1962) 12, p. 831
- 5) H. OPITZ, M. GAPPISCH, W. KÖNIG, R. PAPE, and A. WICHER: Arch. Eisenhüttenw., 33(1962) 12, p. 841
- 6) A. WICHER: Radex-Rundschau, (1965) 2, p. 432
- 7) W. KÖNIG: Ind.-Anz., 87 (1965) 26, p. 463
- 8) W. KÖNIG: Ind.-Anz., 87 (1965) 43, p. 845
- 9) W. KÖNIG: Ind.-Anz., 87 (1965) 51, p. 1033
- 10) E. SCHMEER: Arch. Eisenhüttenw., 39 (1968) 4, p. 277
- 11) A. WICHER and R. PAPE: Stahl u. Eisen, 87 (1967) 2, p. 1262
- 12) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 34 (1968) 10 p. 680
- 13) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 35 (1969) 3, p. 169
- 14) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 35 (1969) 4, p. 227
- 15) 鳴滝良之助, 岩田一明, 山本俊二, 山口喜弘: 鉄と鋼, 56 (1970) 2, p. 391
- 16) 田阪興, 赤沢正久, 片山昌: 昭和43年精機学会秋季大会前刷, p. 19
- 17) 田阪興, 赤沢正久, 片山昌: 昭和44年精機学会春季大会前刷, p. 215
- 18) 臼井英治: 機械試験所報告第43号 (1961)
- 19) H. HOFF and H. Becker: Stahl u. Eisen, 84 (1964) 22, p. 1437
- 20) 文献 17) と同じ, p. 213
- 21) 文献 16) と同じ, p. 21
- 22) R.B.G. YEO: J. Metals, 19 (1967) 6, p. 29
- 23) 大越諄: 精密機械, 35 (1969) 6, p. 352
- 24) G. J. MARSTON and J. D. MURRAY: JISI, 208 (1970) 7, p. 568
- 25) D. B. CLAYTON and J. R. BROWN: Iron Steel, (1968) 8, p. 219
- 26) 奥島啓式: カルシューム脱酸快削鋼に関するシンポジウム資料 (1968年2月16日)
- 27) E. M. TRENT: JISI, 201 (1963) 12, p. 1001
- 28) 山田博之, 伊藤哲朗, 加藤剛志, 藤原達雄: 鉄と鋼, 55 (1969) 11, S 619
- 29) H. LOWACK: Ind.-Anz., 90 (1968) 34, p. 41