

論 文

Ca 快削鋼の介在物形態と被削性*

山田博之**・吉田鎮雄**・木村篤良**・加藤剛志***・伊藤哲朗***

On the Relationship between Machinability and Inclusion Morphology of Ca Bearing Free Machining Steels

Hiroyuki YAMADA, Shizuo YOSHIDA, Atuyoshi KIMURA,
Kôshi KATÔ, and Teturô ITÔ

Synopsis:

The relationships between machinability based on tool life and oxide inclusion morphology of calcium deoxidized Cr-Mo case hardening steels and carbon structural steels, melted by 2 Φ arc furnace, were investigated.

The results are as follows:

1) In the case that the oxide inclusions in the calcium bearing free machining steels are A₂ type which are plastically deformed by hot rolling, the prolongation of tool life is obtained not only for cemented carbide tool but also high speed steel tool.

2) The oxide inclusions contributing to the formation of "Belag" on the cemented carbide tool face are those which soften or melt down at certain cutting temperature on the tool-chip contact surface.

3) Sulfur addition (0.07% S) to the calcium bearing free machining steels is effective for the chip breakability, but the effect is not clear for the tool life.

(Received May 15, 1970)

1. 緒 言

近年、高生産性に対する要求が高まるにつれて生産の自動化が急速に進められてきた。これを実現するための一つとして、素材に対して加工性の良好なことがますます要求されるようになり、このような要求の中で被削性のよい材料、すなわち、通常化学成分の材料に S, Pb, Te, Se, Bi などのいわゆる快削性元素を単独、あるいは複合添加した快削鋼が開発されてきた¹⁾。それらは、現在自動車用をはじめとして多くの機械構造用材料に非常に多く使われるようになってきた。

しかし、これら快削性元素は、常温近辺では鉄に対する固溶度が小さいかあるいは全くなく、多くは化合物の形で介在物として存在している。このため、これら元素を含む快削鋼は、一般に被削性については満足できるものであるが、反面、機械的性質の劣化あるいは材力の異方性が大きくなる傾向をもつことを避けられない。

ところが、アーヘン工科大学の OPITZ ほかに^{2) 3)}(西ドイツ)の研究により、これらの特別の快削性元素を添加しなくとも脱酸の方法、すなわち脱酸剤の使い方により

鋼中に残留する脱酸生成物(酸化物系介在物)を調整すれば、被削性がよくなることがあきらかにされた。これが、いわゆる Ca 快削鋼といわれるもので、脱酸剤として Ca 合金を使用したものである。ただ、Ca 快削鋼の被削性は従来の快削性元素を添加したものややそのおもむきを異にし、従来のものは、ほとんど高速度鋼工具(以下、ハイス工具とよぶ)による切削の場合に被削性がよくなることを特徴としているのに対して、Ca 快削鋼では、超硬工具、とくに TiC を含む超硬工具による切削の場合に被削性がよくなることを大きな特徴としている。

なお、ここで被削性という場合、①工具寿命、②切くず処理性、③仕上面粗さ、の3つの面から判断されるのが一般的であり、快削鋼といわれるものは、これらの1つあるいは2つ以上のすぐれた性質をもつものである。

ところで、従来の快削性元素を含む快削鋼の被削性改

* 昭和44年10月、本会講演大会にて発表
昭和45年5月15日 受付

** 大同製鋼(株)中央研究所

*** 大同製鋼(株)中央研究所 工博

善の機構には、つぎのようなものが考えられている。

すなわち、鋼中に多数存在する快削性元素を含む介在物（快削性介在物）が、①応力集中源になつて切削を容易にする¹⁰⁾¹¹⁾、②内部潤滑作用をする¹²⁾¹³⁾、③工具切くず界面で潤滑作用をする¹⁴⁾、などである。そして、これら快削鋼においては、快削性介在物の大きさ、形状、分布といったいわゆる介在物形態が快削性に大きく影響するといわれている¹⁰⁾¹¹⁾¹⁴⁾。

これに対して、特別な快削性元素を使わず、Ca合金で脱酸したいわゆるCa快削鋼の切削機構は相当異なる¹⁵⁾¹⁶⁾。

すなわち、これまでも多数報告されているように、Ca快削鋼は超硬工具である程度の高切削速度で切削したときに、とくに工具寿命が長くなるという特徴をもっている。

このように、工具寿命が長くなる原因として、Ca快削鋼中の酸化物系介在物が切削時の温度、圧力により工具一切くず界面で軟化あるいは溶解して工具に付着し、この付着物層（ドイツ語で Belag）が工具形成元素の切くず中への拡散を防ぎ、工具の摩耗を抑制すると考えられている^{17)~20)}。

一方、一口にCa快削鋼といつても、Ca合金の種類・使用法、他の脱酸剤との併用、などCa脱酸の方法によつて脱酸生成物（酸化物系介在物）の形態、組成は容易に変化するものである。したがつて、最も望ましいCa快削鋼を製造するためには、どのような切削条件下（切削温度、工具材質など）でどのような酸化物系介在物が望ましいかを知る必要がある。

本論文では、上述したような理由から製鋼条件の調整により、種々の形態、組成の酸化物系介在物を有するCa快削鋼をつくり、これを切削した超硬工具面（とくに、

すくい面）上のBalagの形態、組成との関係を調べ、工具寿命延長に最も望ましい酸化物系介在物の形態、組成を求めることを目的の一つとした。同時に、従来Ca快削鋼はハイス工具で切削した場合には、何ら工具寿命が延長されず、このためにCa+S系の複合快削鋼などが報告されているが²¹⁾²²⁾、はたして酸化物系介在物の組成が異なつた場合でも、工具寿命が延長されないかどうかということ調べることを二つめの目的とした。以下、このような目的でおこなつた実験の結果について述べる。

2. 供 試 材

Table 1 に実験に用いた試料の化学成分を示す。

試料 No の -1- シリーズでは Cr-Mo 肌焼鋼 SCM22、-2- シリーズは炭素鋼 S50C を基本成分としたものである。これらはすべて 2 重 アーク 炉で溶解し、取鍋への出鋼流に CaSi 合金を投入して脱酸処理した（CaSi 脱酸したものは、鋼種記号末尾に Y をつけた）。

ただし、試料 No 1-G、2-E は CaSi 脱酸をせず、FeSi+Al で脱酸処理した基本鋼で、本実験における Ca 快削鋼の比較材としたものである。1.3 重 下注鋼塊を 100φ に圧延後、焼ならし処理をして供試材とした。

Ca 快削鋼中に含まれる Ca 量は 0.001~0.006% の間にあり、酸素量は 0.006~0.017% と比較鋼より高くなつている。

逆に Al 量は比較鋼より少なくなつている。S 量については、炭素鋼ではすべて S50C としての JIS 規格内 ($S \leq 0.035\%$) にはいつているが、Ca 快削鋼では一部、S 量を高くしたものがある (1-E, F)。これは、ハイス工具に対する被削性向上（主として切くず破砕性）をねらつて Ca+S の複合効果を調べるために S を特別に添

Table 1. Chemical composition of steels tested.

Specimen No	Grade	Deoxidizer	Chemical composition (wt%)										Hardness H _B
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ca	Al	O	
1-A	Cr-Mo steel	CaSi	0.21	0.22	0.58	0.012	0.015	0.99	0.18	0.002	0.005	0.017	160
1-B	〃	〃	0.20	0.26	0.77	0.013	0.010	1.01	0.21	0.003	0.006	0.013	170
1-C	〃	〃	0.21	0.31	0.62	0.013	0.027	0.95	0.18	0.004	0.006	0.009	161
1-D	〃	〃	0.20	0.25	0.75	0.011	0.027	1.04	0.18	0.002	0.004	0.014	169
1-E	〃	〃	0.20	0.33	0.74	0.016	0.075	1.01	0.18	0.002	0.006	0.009	167
1-F	〃	〃	0.20	0.34	0.67	0.018	0.055	0.97	0.19	0.005	0.009	0.007	170
1-G	〃	FeSi+Al	0.21	0.30	0.72	0.016	0.015	1.03	0.15	—	0.025	0.004	160
2-A	C steel	CaSi	0.51	0.32	0.67	0.011	0.017	—	—	0.004	0.006	0.008	195
2-B	〃	〃	0.45	0.29	0.66	0.013	0.013	—	—	0.001	0.007	0.006	192
2-C	〃	〃	0.46	0.37	0.69	0.019	0.012	—	—	0.004	0.007	0.006	195
2-D	〃	〃	0.46	0.27	0.70	0.015	0.010	—	—	0.006	0.006	0.010	196
2-E	〃	FeSi+Al	0.53	0.29	0.68	0.010	0.019	—	—	—	0.023	0.005	204

加したものであり、また、規格内にはいつているものも規格範囲内で高低2水準をとつて、Sの影響も調べるこ

とを目的としている。

3. 実験結果および考察

本実験では、介在物については光学顕微鏡による観察と形態の測定、および EPMA (X線マイクロアナライザー)、Br-メタノール法による介在物組成の分析をおこない、被削性の試験は超硬工具、およびハイス工具による工具寿命試験をおこなつた。また、工具寿命試験に用いた超硬工具に付着した Belag については、EPMA を用いてその元素分布および平均組成を、また、Belag の付着状況はあらさ計を用いて求めた。以下、各試験の方法および結果について述べる。

3.1 光学顕微鏡による介在物の観察と結果

まず光学顕微鏡により、観察した各試料中の介在物は、大別して4種類に分類された。すなわち、Photo. 1-a にみられるような熱間圧延によりなめらかに変形されるもの (A_2 系介在物とよぶ)、Photo. 1-a の介在物と同じく熱間圧延により変形されるがやや周囲に凹凸があり、硫化物を複合していたり、異種酸化物が混合していたりすることの多い Photo. 1-b のような介在物 (A_2' 系介在物)、これらに対して、熱間圧延で変形されなくて Photo. 1-c にみられるように丸球状をしているもの (C系介在物、これはときどき、 A_2' 系介在物と混在していることがある)、それに、Photo. 1-d のような通常の Al 脱酸鋼でみられるストリンガー状分布をした Al_2O_3 系介在物 (B系介在物) の4種類である。各試料がどのタイプの介在物を有するかについては Table 2 の右の欄に示した。

ただ、このような定性的な観察結果では十分な解

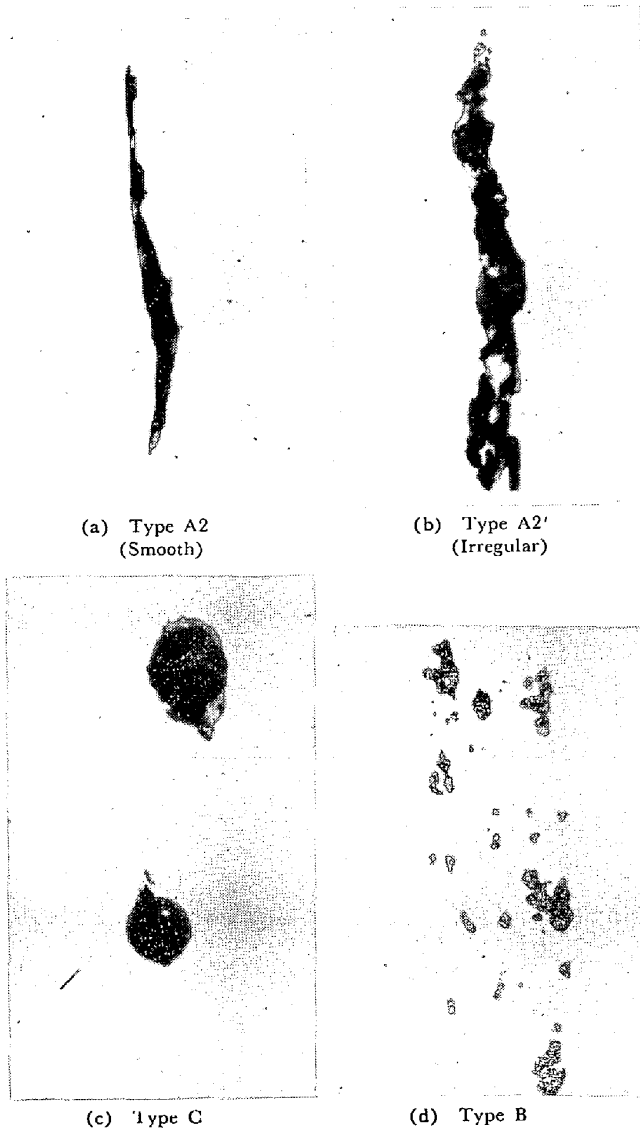


Photo. 1. Microphotographs of various types of oxides ($\times 600$).

Table 2. Morphology of inclusions.

Specimen No	Total area (%)	Sulfide area (%)	Oxide					Type	
			Area	$N (/ mm^2)$	$\bar{L} (\mu)$	$\bar{W} (\mu)$	\bar{L}/\bar{W}		
1-A	0.091	0.025	0.066	8.4	12.9	3.8	3.40	A_2	A_2 : Smooth A_2' : Irregular
1-B	0.101	0.026	0.075	10.0	12.4	4.8	2.58	A_2'	
1-C	0.114	0.067	0.047	6.3	11.7	4.5	2.60	A_2'	
1-D	0.147	0.095	0.052	11.5	15.9	3.9	4.08	A_2	
1-E	0.238	0.218	0.020	3.0	20.5	10.8	1.90	A_2'	
1-F	0.194	0.136	0.058	18.4	7.8	6.2	1.26	C	
1-G	0.073	0.033	0.040	10.9	7.0	5.0	1.40	B	
2-A	0.113	0.048	0.065	11.6	19.2	4.7	4.1	A_2	
2-B	0.149	0.082	0.067	22.7	8.5	4.0	2.1	A_2+C	
2-C	0.093	0.037	0.056	10.1	12.0	8.3	1.5	C	
2-D	0.096	0.029	0.067	11.5	10.8	7.2	1.5	C	
2-E	0.085	0.035	0.050	—	—	—	—	B	

析ができないので、QTM*により介在物の定量的測定をおこなった。すなわち、測定倍率 $\times 1150$ 、視野数 200、測定面積約 10 mm^2 で、酸化物、硫化物の面積率、酸化物の単位面積当たりの個数 (個/ mm^2)、平均の長さ ($\bar{L} \mu$)、平均の幅 ($\bar{W} \mu$) を求め、これらの数値から介在物の展伸度 \bar{L}/\bar{W} を算出した。

ここで酸化物のみ種々の平均を求めたのは、前述したように Ca 快削鋼では酸化物系介在物が快削性介在物になっているからである。結果を Table 2 に示す。

Table 2 からつぎのことがわかる。まず、酸化物系介在物の面積率は $0.020 \sim 0.075\%$ の間にあり、基本鋼に対してほぼ同等で、機械的性質に対してとくに問題となることはないと考えられ、快削性元素を添加した快削鋼とちがって Ca 快削鋼の大きな特徴の 1 つとなっている。

硫化物系介在物の面積率は鋼中 S 含有量にほぼ比例するものであり、本実験に用いた試料でも S の多いものでは面積率が大きくなっている。

酸化物系介在物の数は基本鋼に比してそれほど大きな差はみられない。長さ、幅については、介在物の形状によつて差があるので、これから介在物の大きさを直接比較することはできないが、観察の結果なども含めるとやや Ca 快削鋼の介在物は大きいようである。

平均の長さ、幅から介在物の展伸度を求めたのが \bar{L}/\bar{W} 欄の数字であるが、Table 2 の一番右の欄の観察結果から判定した介在物形状と大体対応がみられ、 $\bar{L}/\bar{W} \geq 3.5$ では A_2 系、 $\bar{L}/\bar{W} \approx 2$ 前後のものは A_2' 系あるいは A_2 系と C 系の混在しているものになり、C あるいは B 系では $\bar{L}/\bar{W} = 1$ になっている。

3.2 EPMA による酸化物系介在物の分析

各試料中に含まれる酸化物系介在物の組成を、まず EPMA により求めた。この場合には、個々の介在物の組成がわかる。Table 3 にその結果を示す。

各試料について 2 つの分析結果を示してあるが、これらのおのおのは代表的測定例である。ここでまず目につくことは、試料によつて 2 つの測定値間のバラツキの大きいものがあることである。たとえば、試料 No 1-C、2-B では大きなバラツキがみられる。前出の Table 2 の介在物観察結果をみると A_2' 系あるいは $(A_2 + C)$ 系介在物を含む試料ほど、このような介在物間の組成のバラツキの大きいことがわかる。すなわち、圧延によつて変形する介在物でも周囲に凹凸があるような A_2' 系介在物を

Table 3. Composition of oxide inclusions with EPMA.

Specimen No	Composition of oxides (%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO
1-A	50	28	13	9
	49	26	8	17
1-B	38	46	6	10
	44	34	6	16
1-C	26	42	0	32
	1	97	0	2
1-D	56	17	11	16
	46	25	12	17
1-E	22	59	0	19
	12	71	0	17
1-F	20	46	0	34
	19	42	0	39
2-A	35	30	0	35
	30	36	0	34
2-B	6	82	0	12
	23	55	0	22
2-C	18	44	0	38
	20	46	0	34
2-D	18	45	0	37
	20	43	0	37

含む試料、あるいは $(A_2 + C)$ 系介在物を含む試料では同一試料内でも介在物間の組成の差がかなりあることがわかる。

したがって、EPMA で求めた介在物組成を用いて、他のデータとの相関をとるためには、かなり多数の測定をしてその平均値をとる必要がある。

本実験においては、EPMA による多数測定の平均値をとるかわりに、Br-メタノール法による抽出介在物の平均組成を求めて利用することにした。

3.3 Br-メタノール法による介在物分析

上述したように、EPMA で各試料中に含まれる介在物の平均組成を求めるには多数の測定が必要であるところから、もう 1 つの介在物分析法である抽出介在物の分析をおこなった。すなわち、Br-メタノール法²³⁾と呼ばれる方法を用いて介在物の平均組成を求めた。

その結果を Table 4 に示す。EPMA で求めた結果 (Table 3) と比較してみると比較的よく合っており、両分析法の精度を互いに保障しあっているといえる。ただ、ここでは上述の理由から以後介在物組成は Br-メタノール法による値を用いる。

さて、Ca 快削鋼の酸化物系介在物組成であるが、肌焼鋼・炭素鋼いずれも CaO, SiO₂, Al₂O₃ を主成分としており、他に MnO のみられるものもある。

一方、基本鋼は Al₂O₃ を主成分とし、これに SiO₂ を 20% 近く含むものである。

Ca 快削鋼の介在物の各成分についてみると、まず CaO の割合は、肌焼鋼では 10~20%、炭素鋼では 26~

* 本装置は、鋼中微小相の形態 (大きさ、数、面積率、ヒストグラムなど) を自動的に測定するもので、光学顕微鏡、テレビカメラ、モニター、検出および計算回路よりなる。England, Metals Research Co. Ltd., 製

Table 4. Composition of oxide inclusions with bromine-methanol method.

Specimen No	Composition of oxide (%)				$\frac{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}{\text{Al}_2\text{O}_3}$
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	
1-A	45	25	19	11	2.56
1-B	42	33	7	18	1.48
1-C	23	53	4	20	0.51
1-D	43	28	19	10	2.21
1-E	23	62	0	15	0.36
1-F	40	47	0	13	0.84
1-G	21	79	0	0	0.27
2-A	37	27	0	37	1.37
2-B	13	57	0	30	0.23
2-C	12	61	0	27	0.20
2-D	26	48	0	26	0.54
2-E	15	85	0	0	0.18

37% で炭素鋼のほうがやや CaO の割合が高い。しかし、それぞれのシリーズでは比較的試料間の差が少ない。

SiO₂ の割合は、肌焼鋼では 23~45%、炭素鋼では 12~37% でいずれもやや試料間の差が大きく、平均的には肌焼鋼のほうが多い。また、Al₂O₃ の割合は、肌焼鋼では 28~62%、炭素鋼では 27~61% となっており、試料間のバラツキは最も大きい。しかし、肌焼鋼と炭素鋼の間の差はない。

なお、MnO の割合は炭素鋼では 0% でほとんど検出されないのに対して、肌焼鋼では最大 19% まで含有されているものがある、MnO の含まれるものはとくに Al₂O₃ が少なく SiO₂ が多くなる傾向がみられる。

ここで、各シリーズ全体をながめてみるとつぎのことに気がつく。

すなわち、①各シリーズ内では CaO 量の差が少ない。②SiO₂ の多いものは相対的に Al₂O₃ が少なく、かつ肌焼鋼では MnO も含まれている。

さて、このような介在物組成は、圧延材中の介在物の形態と関係のあることが考えられる。その関係が Fig. 1 に示してある。Fig. 1 では、Ca 快削鋼に含まれる酸化物系介在物に対して軟かくする傾向をもつと考えられる SiO₂、MnO を分子に、硬くする傾向をもつと考えられる Al₂O₃ を分母にとつた。(なお、CaO 割合との関係については、CaO 割合がほぼ一定であつたため相関がとれなかつた。) この図からつぎのことがわかる。

すなわち、 $(\% \text{SiO}_2 + \% \text{MnO}) / \% \text{Al}_2\text{O}_3$ の比が大きいほど、介在物の展伸度が大きくなっている。このことから、Ca 快削鋼中の介在物が光学顕微鏡観察である程度、組成的特徴が推定できることを示している。

なお、この中には S の高い試料もあるが、酸化物組成

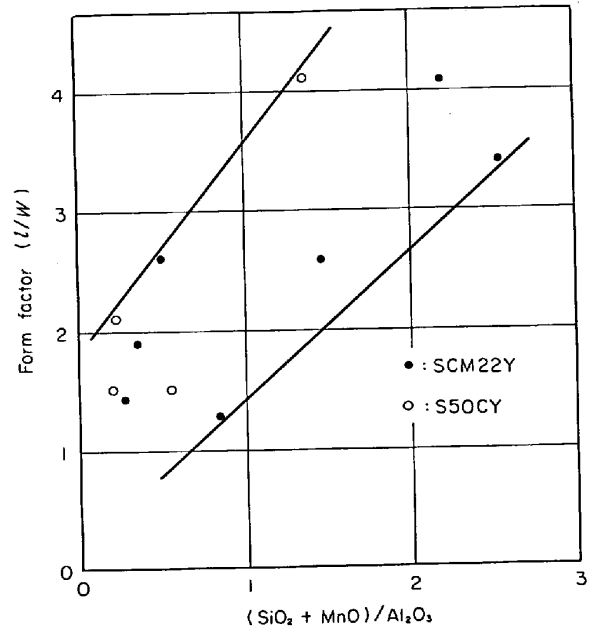


Fig. 1. Relationship between form factor and composition of oxide inclusions.

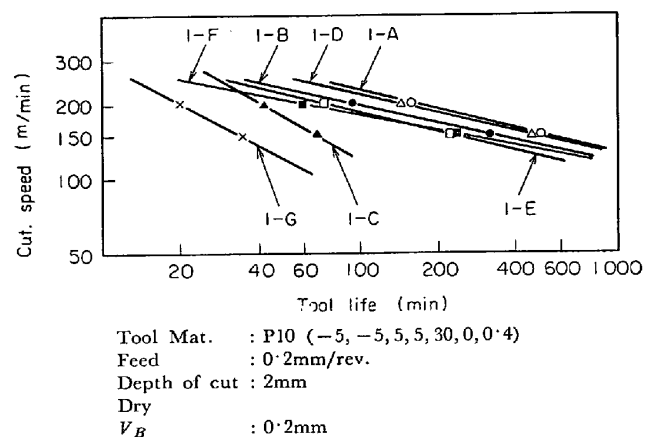


Fig. 2. Tool life curves with cemented carbide tool (Cr-Mo steels).

に対する影響はほとんどないと判断される。

3.4 被削性試験

被削性の判定のために、ここでは超硬工具(P種)、ハイス工具による工具寿命試験をおこなつた。切削はすべて長手旋削である。

3.4.1 超硬工具による試験

Fig. 2 に肌焼鋼シリーズの、また Fig. 3 に炭素鋼シリーズの工具寿命曲線(V-T線図)を示す。切削条件はつぎのとおりである。

工具材種：超硬 P10 種

工具形状：-5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.4

切削速度：150, 200m/min (1部 250m/minでも実施)

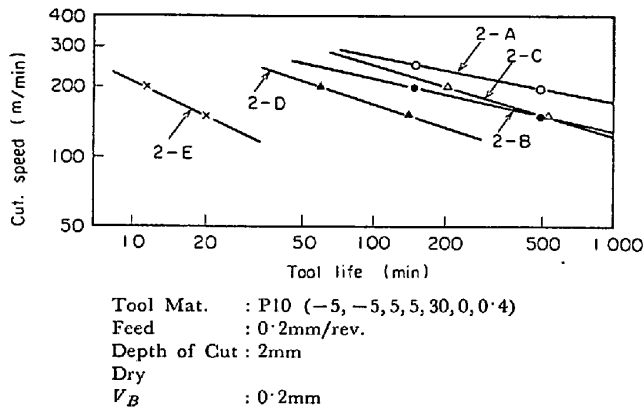


Fig. 3. Tool life curves with cemented carbide tool (carbon steels).

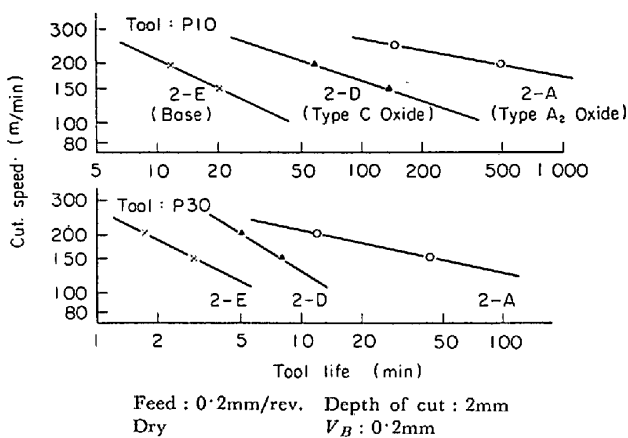


Fig. 4. Effect of oxide inclusion type on the tool life of cemented carbide tool (carbon steels).

送り : 0.2 mm/rev.

切込み : 2 mm

切削油 : 乾切削

工具寿命の判定 : フランク摩耗幅 $V_B = 0.2$ mm
 をもつて寿命とした.

ここで、工具寿命の判定にフランク摩耗幅を用いたのは、Ca 快削鋼の場合、すくい面(クレーター面)に Belag がつき摩耗の進行が抑制され、フランク摩耗の方が速く進行するからである。これらの図よりつぎのことがわかる。

まず、Ca 快削鋼と基本鋼の工具寿命を比較すると明らかに Ca 快削鋼の寿命が長くなっている。すなわち、切削速度 150m/min のときの Ca 快削鋼は比較鋼に対して肌焼鋼で 2~15 倍、炭素鋼で 7~30 倍以上の寿命を示している。

また、Ca 快削鋼の中でも、介在物の形態と関連づけてみると、A₂系介在物、すなわち SiO₂ が多く Al₂O₃ の少ない介在物を含む試料がとりわけ長い工具寿命を示す

ことがわかる。(1-A・D, 2-A)

さらに、Fig. 3からは、A₂系介在物を含む 2-A、2-BとC系介在物を含む 2-C、2-D はそれぞれ同じような傾きをもち、A₂系介在物は低切削速度側で、C系介在物は高切削速度側ですぐれていることが推定される。ただし、ここで低切削速度、高切削速度というのは、Belag の生成するような速度範囲にあることが必要であり、おのずから限界がある。この速度範囲がどの程度であるかについては本実験結果からだけでは明らかでないが、少なくとも本実験範囲内で上述の傾向がみられたということは、介在物の組成と切削条件、とりわけ切削速度(切削温度)が Belag の生成、すなわち工具寿命を左右していることを示すものと考えられる。一方、超硬工具切削に対する S の複合添加効果について 1-C と 1-E を比較すると介在物組成は似ているが、工具寿命値の差が大きく S の多い 1-E の寿命が長いのを S の効果とみると、もう一つの S の多い 1-F の寿命がより長くなつてもよさそうに考えられるが、必ずしもそうなつていないことなどから今回の試験結果ではいずれとも判断ができなかつた。ただし、S の増加によりいずれも切くずの破砕性はよくなつている(ハイス工具切削の結果参照)。Ca 快削鋼の工具寿命に対しては、介在物の組成と切削条件、とりわけ切削速度(切削温度)の影響の大きいことは上述のデータから推定されるが、さらに工具材種の影響も見逃がせない。

Fig. 4 は、とくに工具中の TiC 含有量の異なる同じ P 種の工具、P10(WC 63%, TiC+TaC 28%, Co 9%)と P30(WC 82%, TiC+TaC 8%, Co 10%)で工具寿命の比較をした結果である。

この図から、次のことがわかる。

A₂系介在物を含む 2-A の試料のほうが、いずれの工具でも C系介在物を含む 2-D より寿命が長いことはさきほどの図と同じであるが、この傾向が P30 の場合のほうが強調されてきている。また、寿命値は P10 の方が全般的に長く、P10 工具の方が有利であることがわかる。

これらの結果から、これまでの報告でもいわれているように工具中の TiC が Belag 付着性に影響をもつてることが考えられる。

3.4.2 高速度鋼(ハイス)工具による試験

Fig. 5, 6 に肌焼鋼、炭素鋼の場合の工具寿命曲線を示す。切削条件はつぎのとおりである。

工具材種 : SKH 4

工具形状 : 0, 15, 7, 7, 10, 0, 0.5

切削速度 : 50, 80, 120m/min

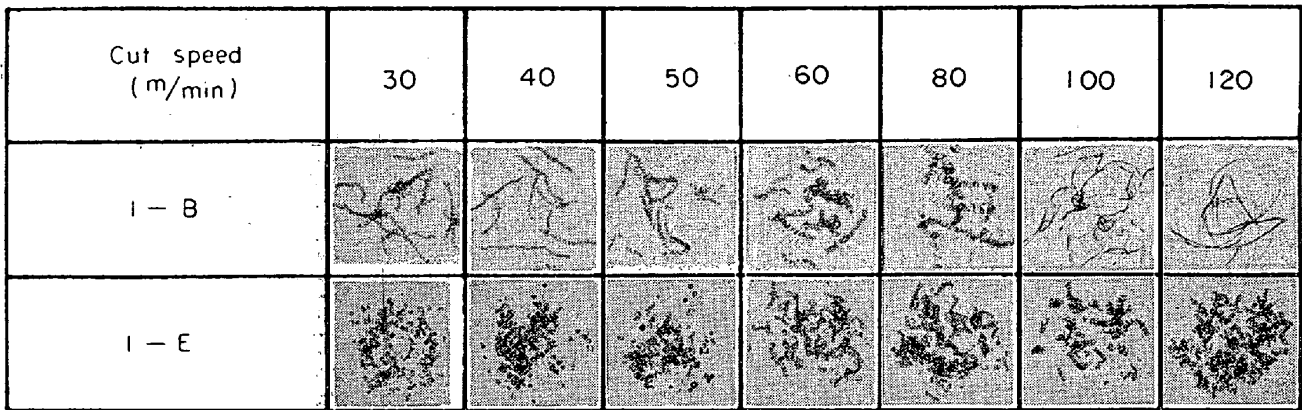


Photo. 2. Photographs of chips in machining specimen No 1-B (0.010% S) and 1-E (0.075% S) by SKH4 tool. ($\times 1/4$)

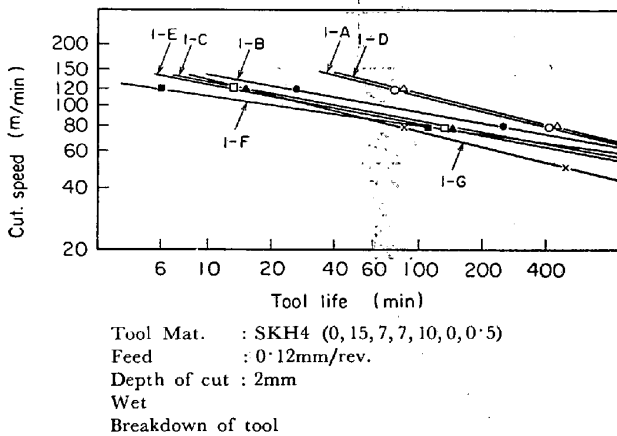


Fig. 5. Tool life curves with HSS tool (Cr-Mo steels).

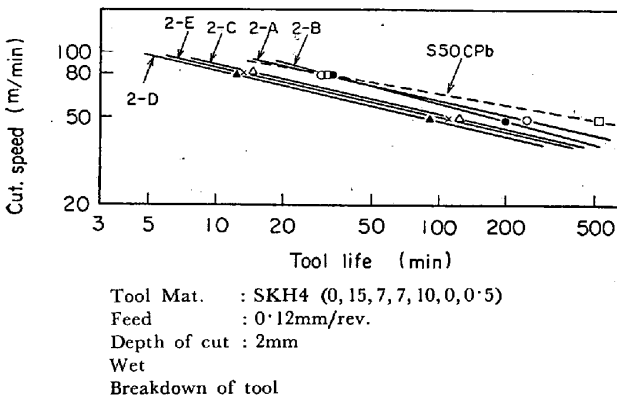


Fig. 6. Tool life curves with HSS tool (carbon steels).

送り : 0.12 mm/rev.

切込み : 2 mm

切削油 : 不水溶性

工具寿命の判定 : 工具が溶損して切削不能になった時点を寿命とした。

これらの図から、まず、超硬工具の場合ほど基本鋼と

Ca 快削鋼の寿命の差が大きくないことがわかる。

しかし、肌焼鋼 (Fig. 5) でより顕著にみられるが、 A_2 系介在物の場合には、いずれの切削速度でも基本鋼より寿命が長くなっている。また、 A_2 系介在物を含む炭素鋼 (2-A, 2-B) でも、切削速度 80m/min で Pb 快削鋼と同じ寿命を示している。これに対して、C系介在物あるいは A_2' , ($A_2 + C$) 系介在物を含むものでは肌焼鋼、炭素鋼いずれも基本鋼と大差ない寿命を示している。ただ、若干寿命曲線の傾きが異なっている。なお、Sを複合した試料は、ここではとくに寿命が長いとはいえず、一方でS量の低い 1-A が最も寿命が長くなっていることから、Sの効果はほとんどみられなかった。ただし、切くずの破碎性に対しては、Photo. 2 (この場合のみ切削速度範囲を低速側で多くとつた。) に示すように、Sの多いものは少ないものに比して明らかによく、この点での効果は認められた。

以上の結果から、従来 Ca 脱酸単独ではハイス工具に対する被削性がよくなるといわれていたが^{24)~26)}、筆者らの実験結果から介在物を調整すれば超硬工具・ハイス工具いずれに対しても被削性のよいものを作ることができることがわかった。Ca 快削鋼の酸化物系介在物の形状が A_2 系の場合にハイス工具切削でも工具寿命の延びることの原因については、超硬工具のように付着物らしいものが明りようには認められず、Belag の効果ということも簡単には予想できないので何か別の機構が考えられるが、この点については目下、検討中である。

3.5 酸化物系介在物の形態、組成と工具寿命

3.4 節で述べたように酸化物系介在物の形態、組成と工具寿命は密接な関係のあることがわかる。そこで、これまでの結果からこの関係をまとめてみた。

Fig. 7 は酸化物系介在物の展伸度 (L/W) と工具寿命、Fig. 8 は酸化物系介在物組成の $(SiO_2 + MnO)/Al_2O_3$

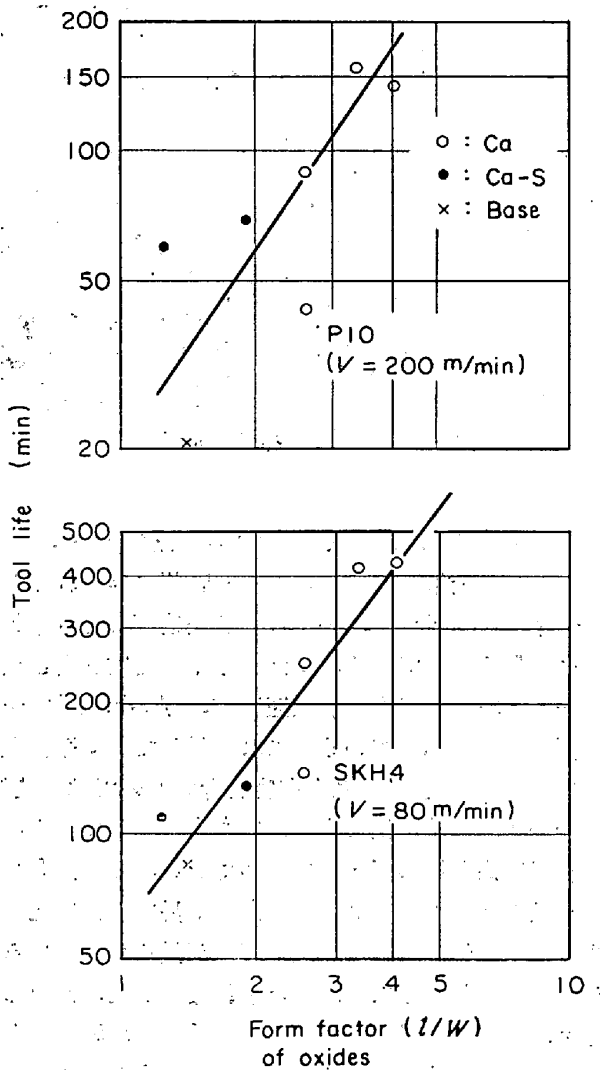


Fig. 7. Relationship between tool life and form factor of oxide inclusions (Spec. No 1 series).

比と工具寿命の関係を示したものである。なお、ここでは測定点の多い試料 No 1 シリーズ (SCM22Y) のみをとりあげ、工具寿命は超硬工具では切削速度 200m/min の、ハイス工具では 80m/min の場合をとった。

これらの図からつぎのことがわかる。すなわち、超硬工具、ハイス工具いずれの場合も展伸度 L/W の大きいもの、すなわち、圧延によりよく変形するもので、組成的には SiO_2 リッチで MnO を含み、 Al_2O_3 の少ないものを含む方が工具寿命が長くなることがわかる。

ここで、先の図で示したように酸化物組成の $(\text{SiO}_2 + \text{MnO})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比と L/W とはある程度の相関があるから、いずれか一方がわかればその酸化物を含む材料の被削性が判定できる。なお、組成については、ここであつかっているものは CaO が 10~20% 含まれることを前提としている。

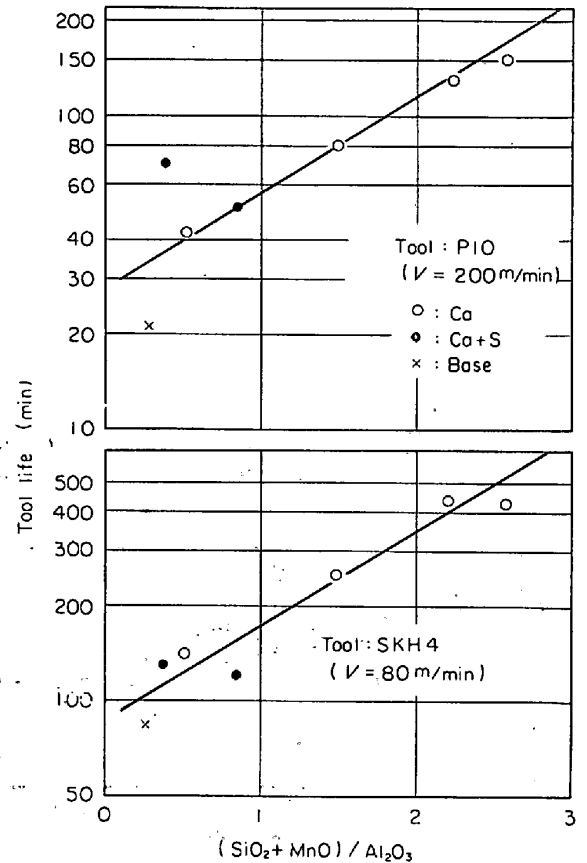


Fig. 8. Relationship between tool life and composition of oxide inclusions (Spec. No 1 series).

ただ、 CaO と工具寿命の相関については、試料間の $\text{CaO}\%$ の変動が小さいため不明確であるが、この問題については今後検討していく予定である。

3.6 超硬工具すくい面上の Belag の調査

3.6.1 超硬工具すくい面の観察

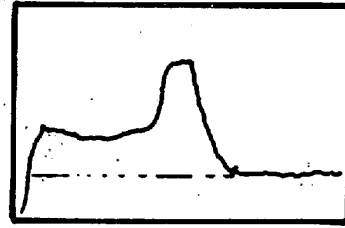
すでに述べたように、Ca 快削鋼を超硬工具で切削したときに工具寿命が長くなるのは、工具すくい面に Belag が生成し、これが工具の摩耗を防護しているためである。

ただし、前述したように、被削材中の介在物の形態によつて工具寿命が変化することが認められた。そこで、被削材中の酸化物系介在物の形態、組成と Belag の関係を調べてみた。まず、各種形態の酸化物系介在物を含む Ca 快削鋼を切削した工具のすくい面を光学顕微鏡により観察し、また、あらさ計により Belag 付着状況を調べた。

Photo. 3-a ~ d がその結果で切削速度おのおの 150m/min で 60min 切削した時のものである。まず、 A_2 系介在物を含む肌焼鋼の場合は (Photo. 3-a) 写真からフランク摩耗(逃げ面摩耗)が非常に少なくなっているこ



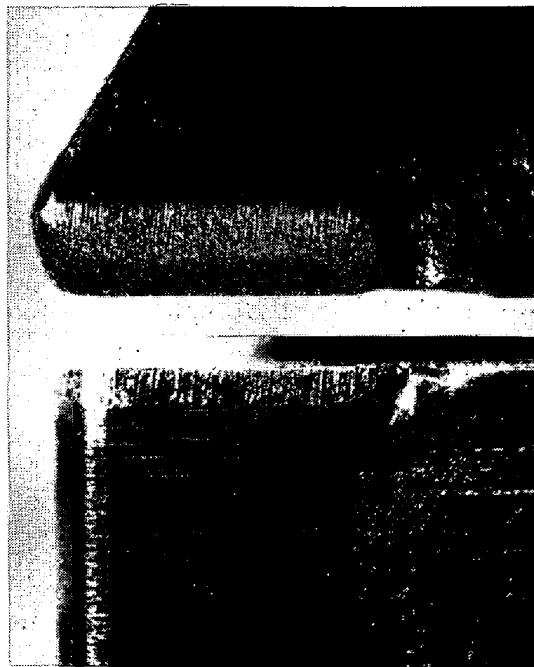
(a)



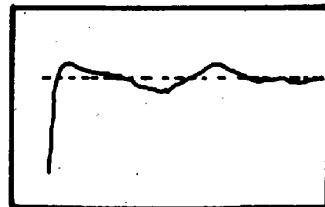
Cut. Mat : SCM22Y containing
type A2
oxide inclusions

Cut. Speed : 150 m/min

Cut Time : 60 min



(b)

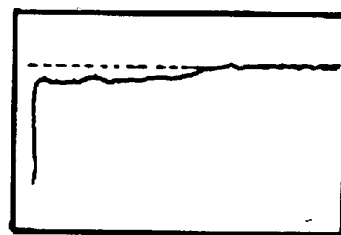


Cut. Mat : SCM22Y containing
type A2'
oxide inclusions

Photo. 3-1. Photographs of cutting edge of P10 tool and the crater wear ($\times 16$).



(c)



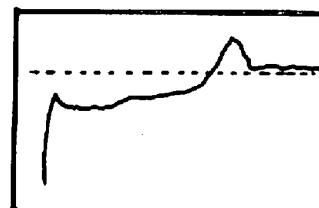
Cut. Mat : S50CY containing
type C
oxide inclusions

Cut. Speed : 150 m/min

Cut. Time : 60 min



(d)



Cut. Mat. SCM22Y containing
type C
oxide plus MnS
inclusions

Photo. 3-2. Photographs of cutting edge of P10 tool and the crater wear ($\times 16$).

とがわかり、一方、すくい面には Belag が非常に多く付着している。

A₂'系介在物になると (Photo. 3-b), Belag はついているがややクレーターが発生しており、また、フランク摩耗も大きくなっている。

これに対して、C系介在物 (Photo. 3-c) あるいはC系介在物と硫化物を多く含む試料 (Photo. 3-d) では、ともに Belag が非常に少なく、クレーターがかなり大きくなっておりフランク摩耗も大きくなっている。

このような工具の観察結果は前節の工具寿命の結果ともよくあい、工具寿命が長いものほど Belag がよくつき、介在物は A₂系であり、したがって (SiO₂+MnO)/Al₂O₃ 比の大きいものであることが推定できる。

そこで、このことをさらに確認するため Belag 組成と介在物組成の関係を調べた。

3.6.2 EPMA による Belag の調査

Ca快削鋼を切削する場合、工具寿命を延長させるには

工具に Belag が付着することが重要であり、この Belag の付着と介在物の形態に関係のあることがわかった。このことから、工具に付着する Belag は、被削材中にある

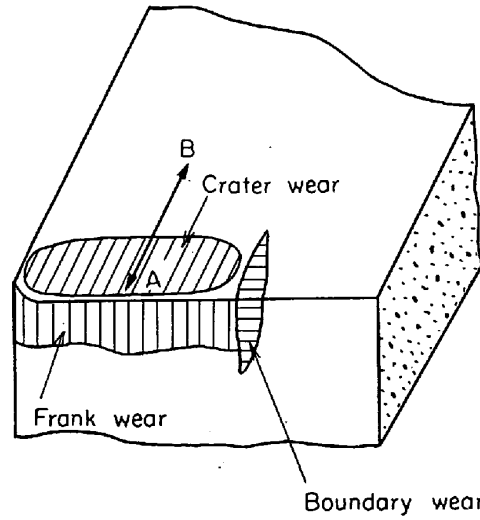


Fig. 9. Position of EPMA line analysis.

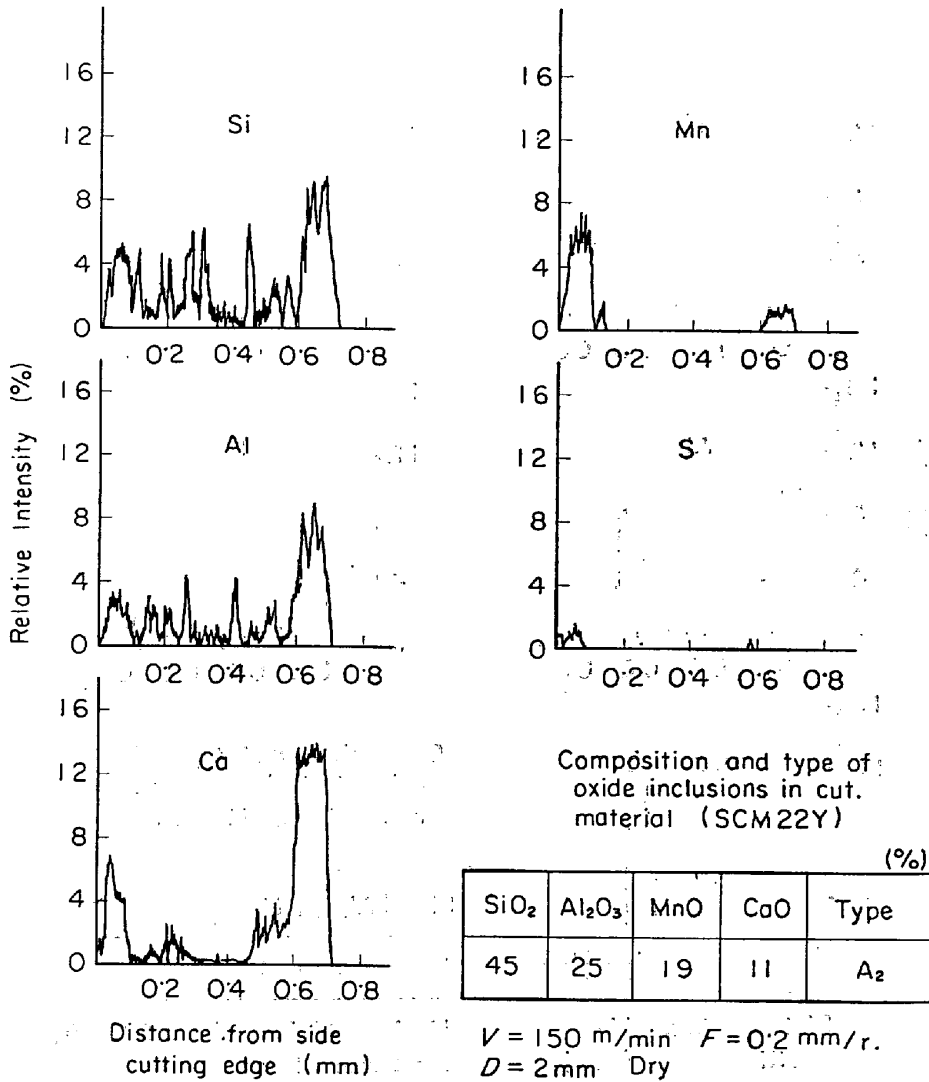


Fig. 10-a. Distribution of chemical elements on the tool (P 10)-chip contact surface.

介在物が切削時に軟化あるいは溶融して工具に付着したものであろうと推定される。そこで、Belag 組成と介在物組成の関係を調べるため、EPMA により Belag 組成を求めた。ところで、Belag は工具すくい面である面積をもつて付着しており、かつ一様な厚さで付着していないので EPMA による点分析の結果では平均的な組成が得られるかどうか不安があつた。そのため、線分析により Belag 形成元素の分布を求め、そこから平均組成を求めた。

Fig. 9 に線分析位置を示す。

すなわち、工具すくい面上でクレーター部のほぼ中間位置に当たる (A-B) 間の元素分布を求めた。工具寿命の判定には、より速く摩耗の進行するフランク摩耗部の摩耗幅をとっているのので、できればフランク摩耗部の Belag を測定するのが望ましいが、この部分の Belag は、工具寿命が長い場合でも非常に付着量が少なかったり、

あるいは不均一に付着していたりすることが多いため、より多く全面に付着しているすくい面上の Belag のみを調べた。

すなわち、フランク摩耗部とすくい面上の Belag はその生成起源は同じと考えられ、したがって組成的にはほぼ同一か、違つても非常にわずかであると考えた。

ここで、横軸は切刃からの距離 (mm)、縦軸は各元素の相対強度をとっている。測定元素としては、Si, Al, Ca, Mn, S をとりあげた。Fig. 10-a ~ d に測定結果を示す。これらの図よりつぎのことがわかる。

まず、Fig. 10-a は、A₂系介在物を含む SCM22Y (試料 No 1-A) を切削した場合のものであり、Si, Al, Ca の分布にやや凹凸があるがすくい面全面に付着していることがわかる。とくに、クレーター後方にあつたところが多くついている。これは、工具一切くず接触部の最も圧力の高いところ (クレーター中心付近) では温度

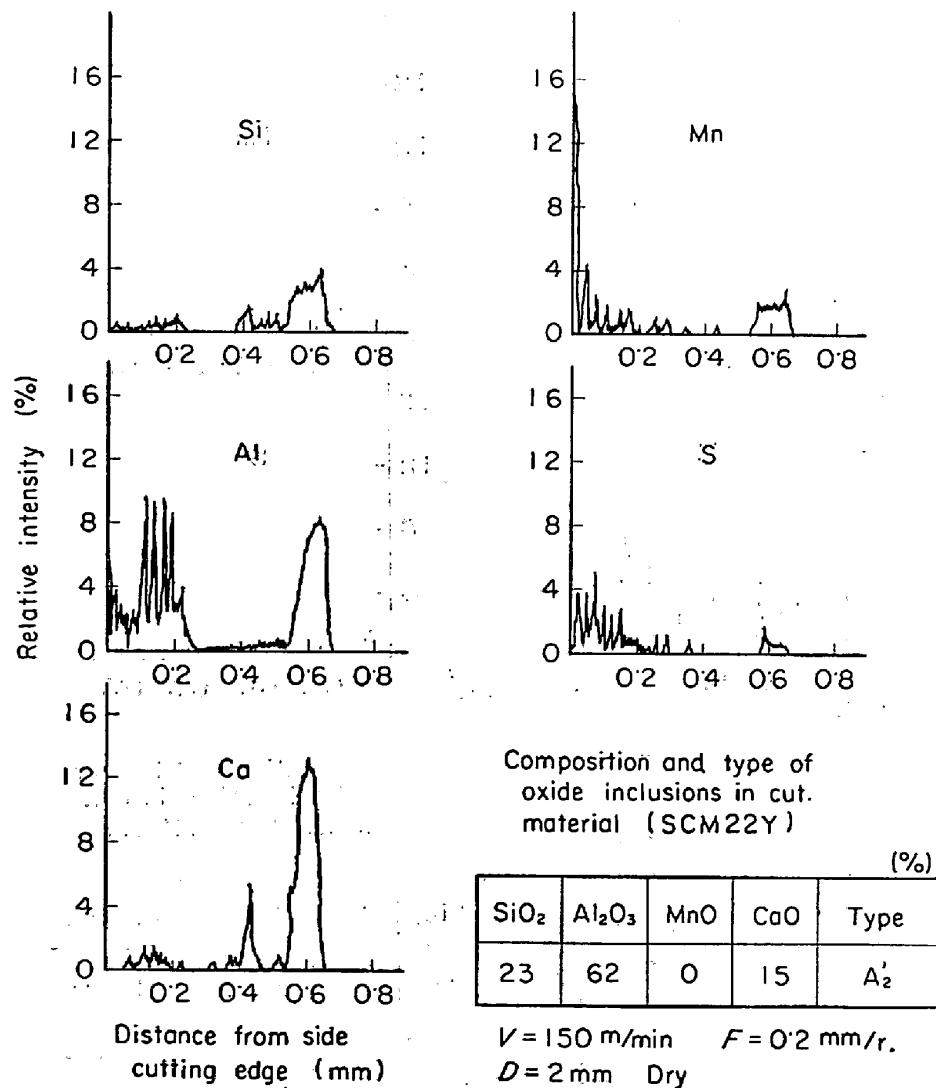


Fig. 10-b. Distribution of chemical elements on the tool (P10)-chip contact surface.

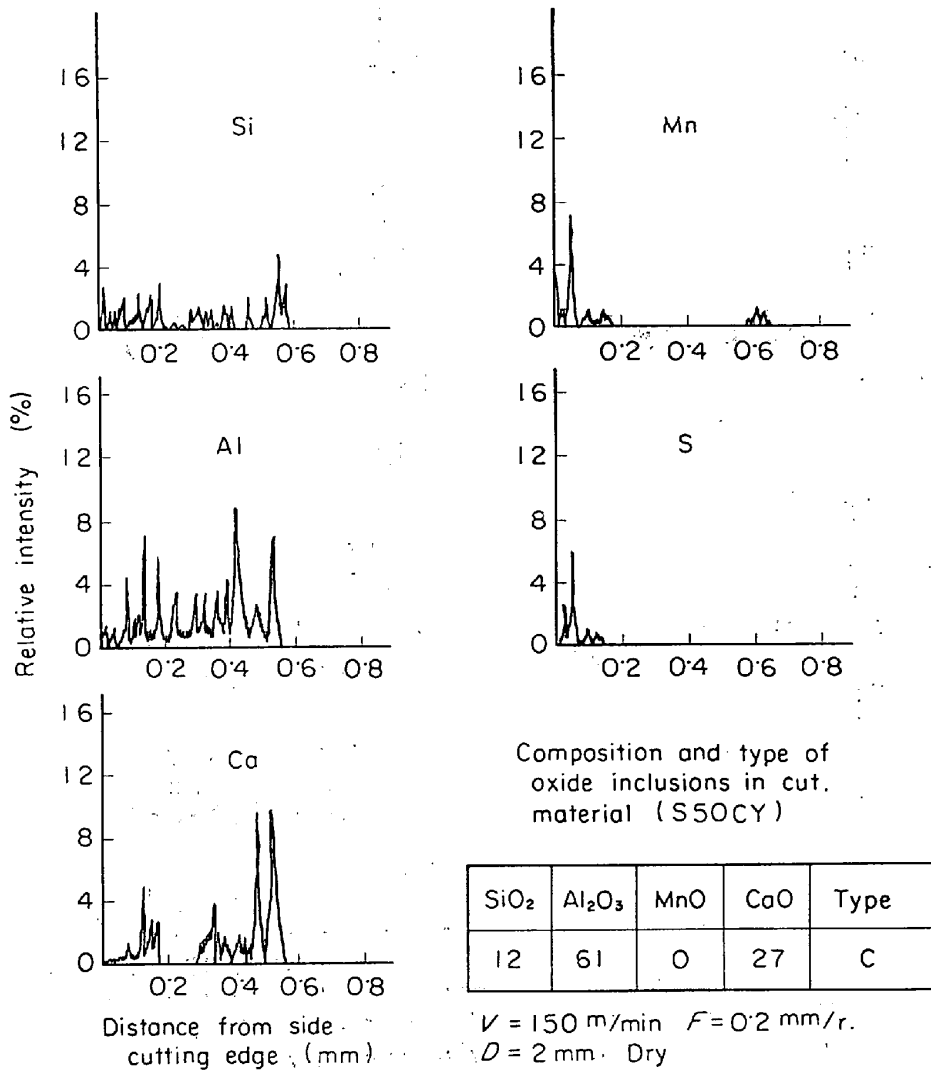


Fig. 10- c. Distribution of chemical elements on the tool (P 10)-chip contact surface.

も高く、接触面にでた介在物が軟化あるいは熔融状態にあり、したがってこれが工具-切くず接触域の後方に押しやられ、堆積したものと考えられる。Mnについては、Si, Al, Caと比較すると相対強度が低い切刃先端部とクレーター後方にみられる。Sの分布と比較すると、切刃付近のものはMn, Sの分布は一致しており、MnSの生成していることがわかる。しかし、クレーター後方のMnの分布はSの分布とは必ずしも一致せず、ここではMn酸化物の存在が考えられる。Fig. 10-bは、A₂'系介在物を含むSCM22Y(試料No 1-b)の場合である。全体的傾向としてはA₂系介在物を含むときと似ているが、ややSiの強度が低くなっている。

また、Mn, Sは分布位置がほぼ一致しており、MnSが主となっており、Mn酸化物の存在はほとんどないと考えられる。なお、MnSはやや広い範囲に分布している。

Fig. 10- c は、C系介在物を含むS50CY(試料No 2-C)の場合である。この元素分布とくに、Si, Al, Caの分布は一応全面に検出されているが、前2図と比較すると相対強度の低いところが多く、かつ、クレーター後方でも前図のようにべつたりついている様子がみえない。かつ、各元素の分布および相対強度から付着量の少ないことがわかる。なお、この場合にも刃先付近にのみMnSの付着がみられる。

最後にFig. 10-dはC系介在物を含み、かつ硫化物を多く含むSCM22Y(試料No 1-F)の場合である。図にみられるように、Si, Al, CaとくにSiの相対強度が低く、付着量としても非常に少ないことがわかる。これに対して、Mn, Sの付着、すなわち、MnSの付着が全面に広がっている傾向がみられる。ただ、この場合にも刃先の方が多くついている。

このように、硫化物の多い試料で、MnSの付着が多

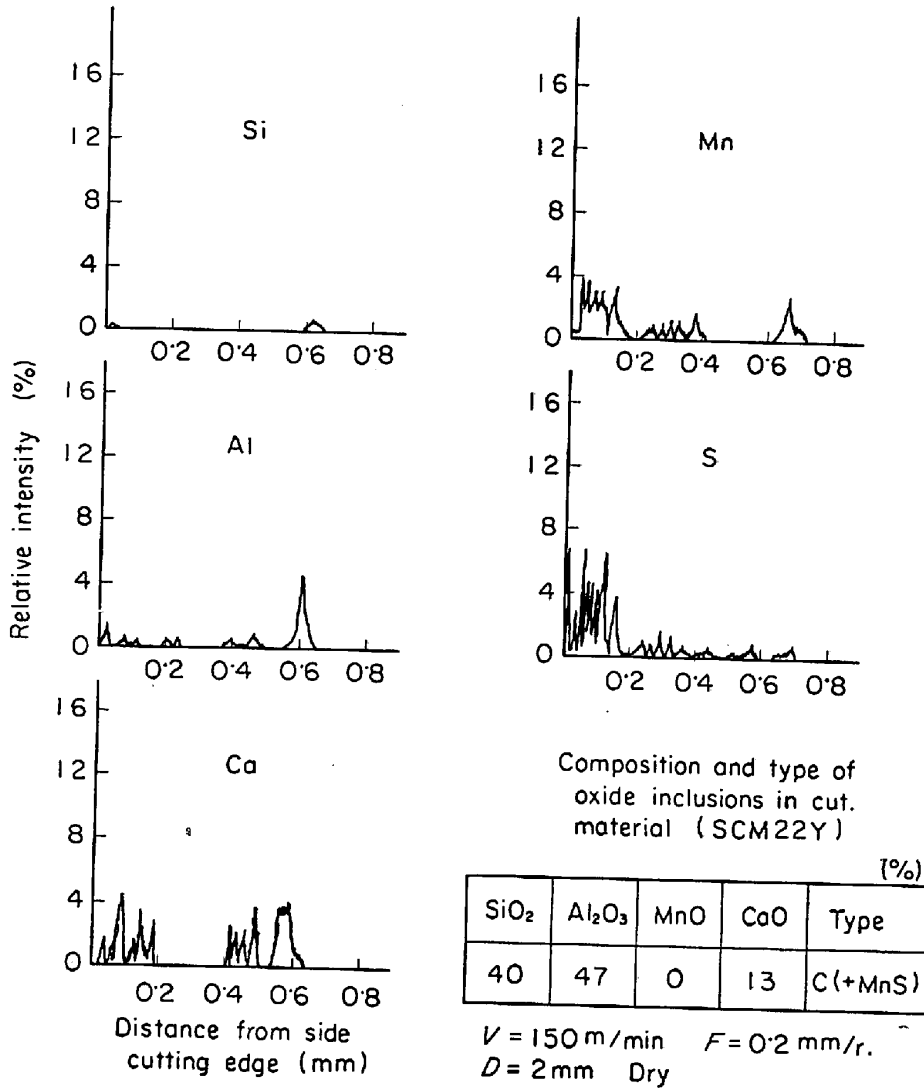


Fig. 10-d. Distribution of chemical elements on the tool (P10)-chip contact surface.

Table 5. Comparison of composition of Belag obtained from line and point analysis.

Specimen No	Method of analysis	Composition of Belag (%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO
1-A	Line	57	22	11	10
	Point 1	42	22	19	17
	Point 2	49	25	3	23
	Point 3	76	20	2	2
	Average of points	56	22	8	14
2-C	Line	41	40	0	19
	Point 1	36	40	0	24
	Point 2	31	50	0	19
	Point 3	77	20	0	3
	Average of points	48	37	0	15

Tool mat : P10 (-5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.4) Cut speed : 150m/min.
Feed : 0.2mm/rev. Depth of cut: 2mm

くなつて酸化物が少なくなつてゐる理由としては、この
ような試料では工具-切くず接触面へでてくる硫化物の
量が多くなり、硫化物が工具に付着すると、これと溶解

度をもたない酸化物の付着がさまたげられるためと考え
られる。以上、Fig. 10の結果から、Belagの生成にと
つて有利な条件として、被削材中の酸化物系介在物が

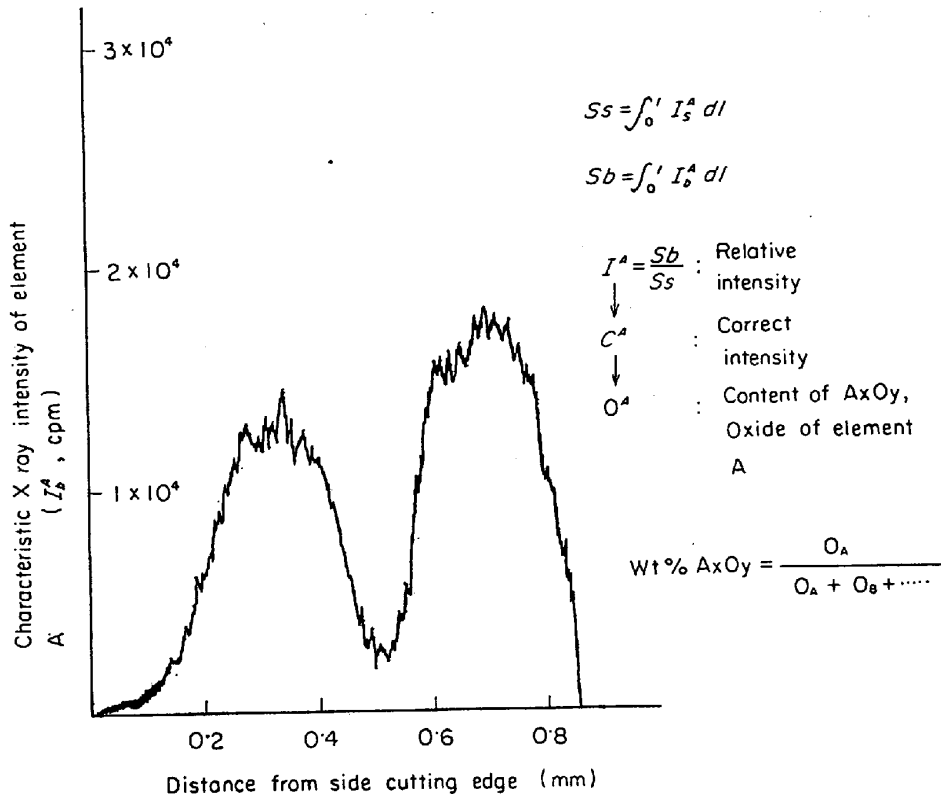


Fig. 11. Method of estimation of average belag composition.

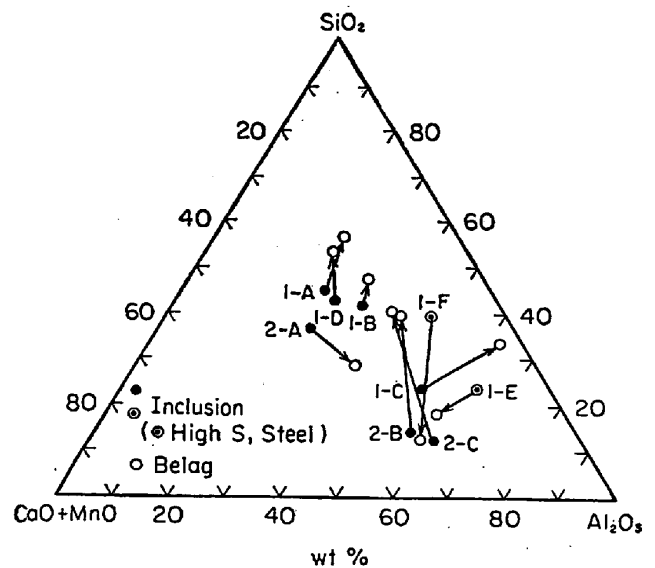
SiO₂ リッチで MnO を含み、かつ Al₂O₃ の少ないものであることがわかる。また、硫化物の存在は、あまり多いとむしろ酸化物の付着が少なくなることもわかる。

つぎに、Belag の組成と介在物の組成の関係について考察してみる。

Belag の平均的組成を求めるのに、さきに求めた EPMA による Belag の線分析の結果を用いた。すなわち、平均組成を求めるために Fig. 11 に示すように線分析の直接の強度を用い、これの刃先から一定距離の間の和(S_b)を求め、この間の各元素のスタンダード強度(S_s)との比から平均の相対強度を求め、あとは介在物組成を求めるのと同じ補正 (PHILIBERT の補正法) をして平均の組成を求めた。

このような平均組成の信頼性を確かめるため、Belag 上の数点で点分析により求めた組成と比較したところ、Table 5 に示したように、点分析値の個々はバラついてはいるが、それらを平均するとほぼ線分析から求めた値に近くなっていた。

こうして求めた Belag の平均組成を、その Belag を生成した被削材中の介在物の平均組成 (Table 4 の値) とともに Table 6 に示した。これを SiO₂-Al₂O₃-CaO 3 元系図の中にプロットしたものが Fig. 12 である。図中、黒丸および 2 重の黒丸 (● と ⊙) は介在物の組成を (⊙ は高 S 試料の介在物)、白丸 (○) は Belag の組成を示



Cut. Mat. : Spec. No 1 series=SCM22Y
 Spec. No 2 series=S50CY
 Tool Mat. : P10. (-5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.4)
 Cut. Speed : 150m/min
 Feed : 0.2mm/rev.
 Depth of cut : 2mm

Fig. 12. Relationship between oxide inclusions in the steels and Belag on the face of tool cutting the corresponding steels.

すものである。(MnO は CaO にプラスした.)

この図から、次のことがわかる。

まず試料 No 1 シリーズの肌焼鋼についてみると No

Table 6. Composition of oxide inclusions in the steels and of Belag on the face of tool cutting the corresponding steels.

Specimen No	Composition of oxide (%)							
	SiO ₂		Al ₂ O ₃		MnO		CaO	
	Incl.	Belag	Incl.	Belag	Incl.	Belag	Incl.	Belag
1-A	45	57	25	22	19	11	11	10
1-B	42	48	33	32	7	0	18	20
1-C	23	34	53	61	4	0	20	5
1-D	43	54	28	22	19	8	10	16
1-E	23	18	62	59	0	0	15	23
1-F	40	12	47	59	0	0	13	29
2-A	37	29	27	39	0	0	36	32
2-B	13	40	57	41	0	0	30	19
2-C	12	41	61	40	0	0	27	19

Cut. Mat. : Spec. No 1 Series=SCM22Y
 Spec. No 2 Series=S50CY
 Tool Mat : P10 (-5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.4)
 Cut. Speed : 150m/min
 Feed : 0.2mm/rev.
 Depth of cut : 2mm

1-A, B, C, D は Belag の組成がいずれも SiO₂ リッチ側に移行している。これに対して、高 S 試料の No 1-E, F は逆に介在物組成の方が SiO₂ リッチになっている。

一方、試料 No 2 シリーズ、すなわち、炭素鋼では 3 試料のうち 2 試料で Belag のほうが SiO₂ リッチになり、1 試料のみ逆になっている。

すなわち、高 S 試料を除くと、Belag の組成は被削材中の介在物組成より SiO₂ リッチになり、高 S 試料では逆になるという傾向がみられる。この原因としては、ここで用いた切削条件において、ある範囲内で種々の組成をもつ鋼中介在物のうち、SiO₂ リッチのものが優先して工具に付着したものと考えられる。したがって、より高速切削、すなわち、より高い切削温度になれば SiO₂ が相対的に少なく、CaO, Al₂O₃ が相対的に多い SiO₂-Al₂O₃-CaO 3 元素でより高融点側の Belag の生成が推定される。

一方、高 S 試料にあつては、線分析結果からもわかるように、硫化物の影響を受けて酸化層の付着がもともと少なく、かつ不均一になっていることが考えられ、このような結果になつたと考えられるが、詳細については十分検討していない。

4. 結 論

2 号 アーク炉により CaSi 脱酸して溶製した Cr-Mo 肌焼鋼 (SCM22Y)、機械構造用炭素鋼 (S50CY) について、酸化物系介在物の調査、超硬工具、高速度鋼工具による工具寿命試験、および、超硬工具すくい面上の付

着物 (Belag) の調査により以下の結論が得られた。

(1) Ca 快削鋼中の酸化物系介在物は大きく 2 つのグループに分けられる。すなわち、圧延によりなめらかに変形するもの (A₂ 系介在物) とほとんど変形しないもの (C 系介在物) に分けられる。组成的には、前者は相対的に SiO₂ が多くて Al₂O₃ が少なく、後者はその逆になっている。ただし、CaO 量については同一鋼種内では酸化物系介在物の形による変動は少ない。

(2) Ca 快削鋼の被削性は、超硬工具 (P 種)、高速度鋼工具 (SKH 4) いずれの工具による切削においても、被削材中の酸化物系介在物の形状、組成と密接な関係のあることがわかった。すなわち、いずれの工具の場合も本実験で用いた切削条件下では A₂ 系介在物を含む Ca 快削鋼のほうが工具寿命が長い。

(3) 一方、Ca 快削鋼に S を複合添加 (0.07% S) したものである、高速度鋼工具の工具寿命に対する効果が明確でなかつた。しかし、切くず破砕性に対しては効果を認めた。

(4) Ca 快削鋼を超硬工具で切削した場合、工具寿命が延長されるのは、工具表面に、被削材中に含まれていた酸化物系介在物が工具-切くず接触部で軟化あるいは溶融して付着した Belag が工具の拡散摩耗を防護しているためであり、したがって、被削材中の酸化物系介在物のうち、その切削温度で軟化あるいは溶融するものだけが選択的に Belag 生成にあずかっていると考えられる。

(5) A₂ 系介在物を含む Ca 快削鋼が、高速度鋼工具の寿命を延長する原因については、まだ十分検討がで

きていないが、介在物の融点が比較的低いこと、したがって工具に対してアブレッシブな作用をしないこと、あるいはこれが潤滑作用をしているのではないかと推定される。

なお、Ca 快削鋼の切削機種などについては、精機学会に報告¹⁵⁾²⁷⁾してあるのでそちらを参照されたい。

終わりに、本研究の発表をお許しいただいた大同製鋼中央研究所取締役所長・浅田千秋博士、同星崎工場長・藤原達雄博士、ならびに研究を遂行するに当たり、有益な助言と協力をいただいた当社中央研究所・阿部山尚三研究員、柳田稔研究員、林清英氏に感謝の意を表します。

文 献

- 1) E. S. NACHTMAN: Machine Design, (1965), Sept. 9, p. 51~53
- 2) H. OPITZ and M. GAPPISCH: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962) 12, p. 841~851
- 3) A. WICHR and R. PAPE: Stahl u. Eisen, 87 (1967) 20, p. 1169~1178
- 4) A. WICHER and R. PAPE: Stahl u. Eisen, 87 (1967) 21, p. 1262~1269
- 5) E. SCHMEER: Arch. Eisenhüttenw., 39 (1968) 11, p. 277~282
- 6) W. KÖNIG: Indust. Anzeiger, 87 (1965) 26, p. 463~470
- 7) W. KÖNIG: Indust. Anzeiger, 87 (1965) 43, p. 845~850
- 8) W. KÖNIG: Indust. Anzeiger, 87 (1965) 51, p. 1033~1038
- 9) H. OPITZ: Int. Res. Prod. Engng. (1963), ASME, p. 107
- 10) 浅田, 藤原ら: 電気製鋼, 32 (1961) 2, 74~82
- 11) 伊藤, 加藤, 山田: 電気製鋼, 38 (1967) 5, p. 237~257
- 12) M. E. MARCHANT: Appl. Phys., 16 (1945) J
- 13) 小林, 村田: 日本金属学会報, 5 (1966) 576, p. 363~368
- 14) 荒木, 谷地: 鉄と鋼, 52 (1964) 4, p. 246
- 15) 伊藤, 木村: 精機学会秋期講演会前刷, (1969), p. 235~238
- 16) 伊藤, 加藤ら: 自動車技術, 23 (1969) 10, p. 1067~1071
- 17) 奥島, 鳴滝: 精密機械, 35 (1962) 2, p. 28~34
- 18) 加藤, 吉田: 精機学会秋期講演会前刷, (1969), p. 243~246
- 19) 田阪, 赤沢: 金属学会報, 8 (1969) 9, p. 587~597
- 20) 鳴滝, 岩田ら: 鉄と鋼, 56 (1970) 3, p. 391~401
- 21) 田阪, 赤沢ら: 精機学会春期講演会前刷, (1969), p. 213~216
- 22) 岡田, 浜端ら: 住友金属, 21 (1969) 3, p. 97~115
- 23) 栢山, 加藤ら: 金属学会秋期講演会前刷, (1969), p. 199
- 24) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 34 (1968) 10, p. 680~686
- 25) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 35 (1969) 3, p. 169~175
- 26) 精機学会切削性分科会: 精密機械, 35 (1969) 4, p. 227~237
- 27) 伊藤, 木村: 精機学会春期講演会前刷, (1970), p. 263~264