

## Ca 脱酸鋼の被削性に関する研究\*

70552 (脱酸法および化学成分の影響について)

鳴滝良之助\*\*・岩田一明\*\*・山本俊二\*\*\*・山口喜弘\*\*\*\*

## Machinability of Calcium-Deoxidized Steel

(Effects of deoxidation and chemical composition on machinability of steel)

Ryonosuke NARUTAKI, Kazuaki IWATA,  
Syunji YAMAMOTO, and Yoshihiro YAMAGUCHI

## Synopsis:

In order to evaluate the feasibility of Ca-deoxidized steels, machinability tests on variously deoxidized 0.45%C steels are done with carbide tools. The effects of deoxidation on the machinability based on tool life are investigated, and the relationship between oxygen-, aluminum-, calcium-contents in steels and their tool life characteristics is determined.

Generally, the higher oxygen content in steel is favorable for the formation of oxide layer on the tool face during cutting various steels. In cutting the steels deoxidized appropriately with Ca, however, the tool wear is found to be considerably suppressed even if their oxygen contents are fairly low. In these cases, very thin oxide layers are observed on tool faces. It seems that the formation of thick oxide layer on tool face is only sufficient condition for good machinability but is not necessary one. Negative correlation is observed between Al content and machinability of Ca-deoxidized steels.

It is confirmed that the Ca-deoxidation is applicable to Cr-Mo steels and resulfurized steels for good machinability, too.

The results of identifying analysis of oxide layers on tool faces are discussed.

(Received Sept. 22, 1969)

## 1. 緒 言

超硬工具で鋼を切削する際に、その工具寿命が脱酸方法、したがって鋼中の脱酸生成物の影響を強く受けることに関しては、1960年前後<sup>1)~4)</sup>の OPITZ らの報告以来多くの研究がなされ、その結果、ある特定範囲の合金を用いて脱酸した鋼では、鋼中の酸化物が切削中に超硬工具の刃面に選択的に溶着し、酸化物層を形成し、工具摩耗を効果的に抑制することが明らかになり、新しい概念の快削鋼の出現として多くの関心を集めるようになった<sup>1)~11)</sup>。

わが国においても 1965 年頃より主として精機学会を中心とした研究活動が開始され<sup>12)~14)</sup>、現在各所で活発な研究が続けられてきている。この種類の残留脱酸生成物を調整することにより被削性を改善した鋼は多くの場合 Ca を含む合金で脱酸することにより得られることから、Ca (脱酸) 快削鋼とか、あるいは特殊脱酸 (調整) 鋼とか称されている。

著者らも Ca 脱酸快削鋼の被削性に関する一連の研究を行なっているが、本報では主として各種鋼の被削性と

脱酸方法、化学成分などの相関について述べる。

## 2. 供試鋼および実験方法

本試験の供試鋼は大きくは 3 グループに分類できる。第 1 のグループは小形溶製炉でかなり広範な脱酸条件下で溶製した 0.45% C 鋼、第 2 のグループは各種脱酸法で転炉および平炉を用いて現場溶製した 0.45% C 鋼、第 3 のグループは合金成分の影響を見るために Cr-Mo 鋼および硫黄快削鋼に各種脱酸を行なった鋼である。それら供試鋼の化学成分を Table 1 に示す。第 1 グループの M-3 と M-3\* は同一脱酸条件で溶製した鋼であり、同一溶製条件の鋼の切削挙動の再現性を検討するためのものである。

各鋼は Cr-Mo 鋼 SCM 4 を除いてすべて 850°C 3 hr 加熱後空冷の焼ならし状態、SCM 4 は同じ温度から

\* 昭和44年3月本会講演大会にて発表

昭和44年9月22日受付

\*\* 神戸大学工学部 工博

\*\*\* (株)神戸製鋼所中央研究所 工博

\*\*\*\* (株)神戸製鋼所中央研究所

Table 1. Chemical composition of steels tested.

| Group                      | Deoxidizer                               | Mark                          | Chemical composition (%) |       |       |       |       |       |      |       |       |             | $\Sigma O$<br>(ppm) | Fur. <sup>1)</sup><br>nacc | Remarks               |                       |
|----------------------------|--|-------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                            |  |                               | C                        | Si    | Mn    | P     | S     | Ni    | Cr   | Mo    | Ca    | $\Sigma Al$ |                     |                            |                       |                       |
| 1                          | Various kinds<br>of Ca-Si-Al-<br>Alloys  | M-1                           | 0.44                     | 0.48  | 0.76  | 0.007 | 0.008 | —     | —    | —     | —     | 0.011       | 0.007               | 70                         | I F<br>(100k g)       | 0.45%<br>Carbon steel |
|                            |  | M-2                           | 0.46                     | 0.30  | 0.70  | 0.007 | 0.010 | —     | —    | —     | —     | 0.009       | 0.025               | 79                         |                       |                       |
|                            |  | M-3                           | 0.46                     | 0.27  | 0.65  | 0.007 | 0.010 | —     | —    | —     | —     | 0.008       | 0.016               | 128                        |                       |                       |
|                            |  | M-3*                          | 0.45                     | 0.27  | 0.59  | 0.007 | 0.009 | —     | —    | —     | —     | 0.007       | 0.019               | 112                        |                       |                       |
|                            |  | M-4                           | 0.41                     | 0.20  | 0.50  | 0.008 | 0.009 | —     | —    | —     | —     | 0.004       | 0.002               | 121                        |                       |                       |
|                            |  | M-5                           | 0.43                     | 0.20  | 0.55  | 0.009 | 0.010 | —     | —    | —     | —     | 0.004       | 0.020               | 92                         |                       |                       |
|                            |  | M-6                           | 0.43                     | 0.22  | 0.59  | 0.007 | 0.008 | —     | —    | —     | —     | 0.003       | 0.021               | 93                         |                       |                       |
|                            |  | M-7                           | 0.44                     | 0.24  | 0.55  | 0.007 | 0.009 | —     | —    | —     | —     | 0.002       | 0.006               | 120                        |                       |                       |
|                            |  | M-8                           | 0.40                     | 0.23  | 0.53  | 0.007 | 0.009 | —     | —    | —     | —     | 0.003       | 0.015               | 94                         |                       |                       |
|                            |  | M-9                           | 0.41                     | 0.27  | 0.58  | 0.007 | 0.010 | —     | —    | —     | —     | 0.002       | 0.025               | 82                         |                       |                       |
|                            |  | M-10                          | 0.43                     | 0.24  | 0.57  | 0.007 | 0.009 | —     | —    | —     | —     | 0.006       | 0.007               | 101                        |                       |                       |
|                            |  | M-11                          | 0.47                     | 0.28  | 0.62  | 0.014 | 0.008 | 0.03  | 0.08 | 0.01  | —     | 0.002       | 0.002               | 43                         |                       |                       |
| M-12                       | 0.45                                     | 0.25                          | 0.70                     | 0.014 | 0.010 | 0.04  | 0.01  | 0.01  | 0.01 | 0.004 | 0.003 | 63          |                     |                            |                       |                       |
| 2                          | Fe-Si Alloy                              | G-1                           | 0.48                     | 0.26  | 0.75  | 0.024 | 0.016 | —     | —    | —     | —     | 0.004       | 20                  | LD                         | 0.45%<br>Carbon steel |                       |
|                            |  | G-2                           | 0.50                     | 0.25  | 0.75  | 0.018 | 0.014 | —     | —    | —     | —     | 0.001       | 25                  |                            |                       |                       |
|                            | Ca-Si Alloy<br>+Al                       | E-1                           | 0.48                     | 0.28  | 0.73  | 0.018 | 0.016 | —     | —    | —     | —     | 0.004       | 0.033               | 28                         |                       | OH                    |
|                            |  | E-2                           | 0.42                     | 0.29  | 0.67  | 0.010 | 0.015 | —     | —    | —     | —     | 0.002       | 0.024               | 49                         |                       |                       |
|                            |  | E-3                           | 0.42                     | 0.25  | 0.82  | 0.014 | 0.019 | —     | —    | —     | —     | 0.001       | 0.033               | 15                         |                       |                       |
|                            | Ca-Si Alloy<br>+a little<br>amount of Al | F-1                           | 0.51                     | 0.23  | 0.46  | 0.015 | 0.012 | —     | —    | —     | —     | 0.002       | 0.004               | 31                         |                       | LD                    |
|                            |  | F-2                           | 0.49                     | 0.25  | 0.51  | 0.014 | 0.016 | —     | —    | —     | —     | 0.002       | 0.007               | 24                         |                       |                       |
|                            |  | F-3                           | 0.41                     | 0.28  | 0.44  | 0.007 | 0.012 | —     | —    | —     | —     | 0.002       | 0.003               | 30                         |                       |                       |
|                            |  | F-4                           | 0.49                     | 0.25  | 0.81  | 0.011 | 0.020 | —     | —    | —     | —     | 0.003       | 0.010               | 23                         |                       |                       |
|                            | F-11                                     | 0.49                          | 0.27                     | 0.83  | 0.016 | 0.019 | —     | —     | —    | —     | 0.002 | 0.014       | 50                  |                            |                       |                       |
|                            | 3  | Fe-Si alloy+Al<br>Ca-Si Alloy | C-1                      | 0.44  | 0.22  | 0.74  | 0.017 | 0.019 | 0.04 | 1.02  | 0.26  | —           | 0.034               | 24                         |                       | E F                   |
| C-2                        |  |                               | 0.38                     | 0.32  | 0.72  | 0.014 | 0.019 | 0.10  | 1.04 | 0.26  | 0.003 | 0.005       | 63                  |                            |                       |                       |
| Fe-Si Alloy<br>Ca-Si Alloy |  | S-1                           | 0.37                     | 0.24  | 1.42  | 0.025 | 0.090 | 0.02  | 0.04 | —     | —     | 0.007       | 99                  | LD                         |                       |                       |
|                            |  | S-2                           | 0.41                     | 0.26  | 1.44  | 0.026 | 0.092 | 0.02  | 0.03 | —     | 0.002 | 0.005       | 52                  |                            |                       |                       |

<sup>1)</sup> IF: Induction Furnace, LD: LD Converter, OH: Open Hearth Furnace, EF: Electric Furnace

徐冷の完全焼なまし状態でそれぞれ試験に供せられた。供試鋼寸法は第1グループは直径 80 mm, 第2, 第3グループは直径 100 mm で, 長さは各 450 mm である。

供試状態の各鋼のかたさはすべて Hv 150~200 の範囲に分布している。

切削試験は主として超硬工具を用いて行なつた。材種は P10 (タンガロイ TX10), 形状は (-5, -5, 5, 5, 15; 15, 0.5) で, スローアウェイ工具である。また使用工作機械は昌運カズヌーブ高速旋盤 HB500 である。試験に際しては切削速度を変数として, 工具のすくい面のクレータ摩耗, にげ面のフランク摩耗ならびに工具面上の酸化物層の生成状況を調査した。クレータ摩耗ならびに酸化物層の測定には触針式万能表面形状測定機 (小坂研究所製 SE33 形), フランク摩耗の測定には工具顕微鏡 (オリンパス STM 形), そして酸化物層組成の調査には X 線マイクロアナライザ (島津製作所 EMX 2 形) を用いた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 0.45% C 鋼の短時間工具摩耗試験結果

Fig. 1 はグループ 1 および 2 の各供試鋼の工具摩耗追

跡結果の代表例である。横軸に切削時間, 縦軸にクレータ摩耗深さ  $K_T$  および酸化物層最大厚さ  $\delta_b$  をとっている。フランク摩耗幅も測定したが, この領域の切削条件ではクレータ摩耗が先行し, 工具寿命を支配するので, フランク摩耗追跡結果はここではふれないことにする。なお, 切削条件は送り 0.25 mm/rev., 切込み 1.5 mm, 切削速度 200m/min で, 切削油削は用いていない。

同図より明らかなように, 一般に工具すくい面に酸化物層が生成すると工具摩耗の進行速度が非常に低くなる。いつぼう, 顕著な酸化物層が生成しなくても工具摩耗が効果的に抑制されうる場合があることにも留意しなければならない。また, にげ面にも明りような酸化物層が生成しうることが認められた。

Fig. 2 は以上のような実験結果をもとにして, 鋼中の Ca,  $\Sigma Al$ ,  $\Sigma O$  量と切削時の超硬工具刃面上の酸化物層生成および工具摩耗状況の対応を示したものである。すでに多くの議論がなされているように, 鋼のこのような切削時の挙動が鋼中の脱酸生成物の組成, 量および分布と密接な関係にあることは容易に考えられるが, 現象論的に Ca,  $\Sigma Al$ ,  $\Sigma O$  量と切削挙動の間にも明りような相関が存在することが同図から認められる。 $\Sigma Al$  量

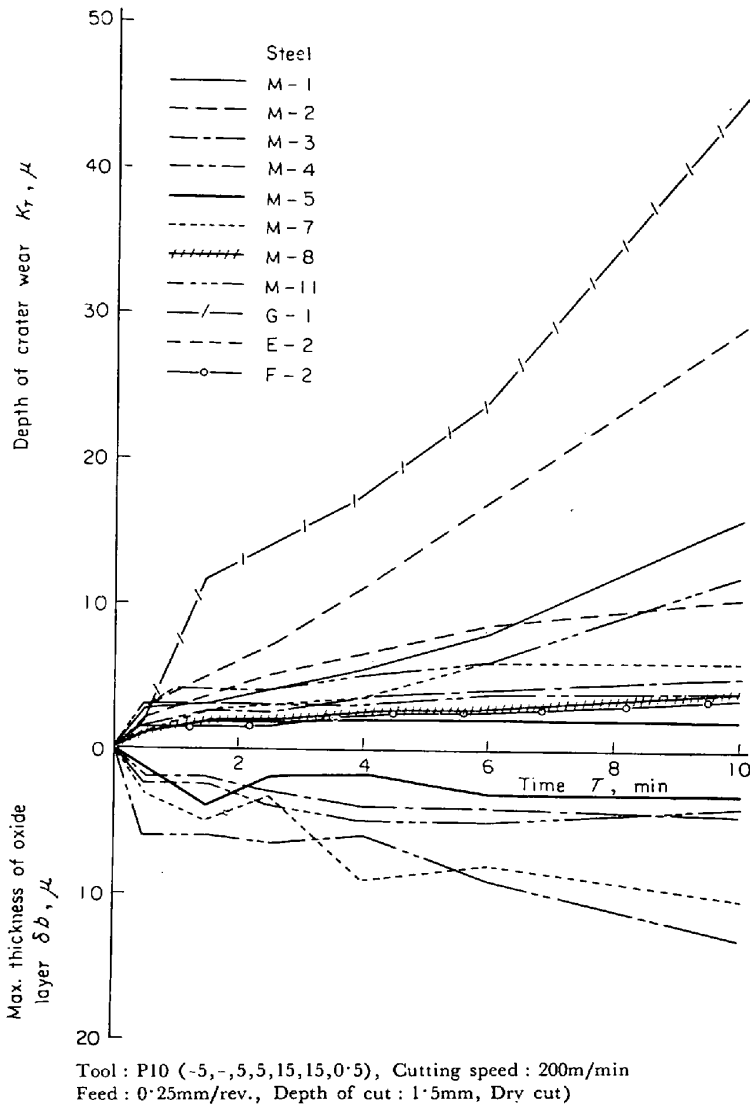


Fig. 1. Comparison of tool wear and oxide layer formation on tool face among various steels tested.

が高くなるにしたがい酸化層が生成しにくくなり、また Ca 量も高すぎるとかえって被削性が低下する傾向にある。Ca 量の影響に関しては SCHMEER の結果<sup>10)</sup>と対応すると考えられる。また、本実験の範囲では  $\Sigma O$  量が高くなるほど酸化層生成に好適な成分領域が広がるということが認められる。工具面上に顕著な酸化層が生成するか否かを示す境界面近くの領域では、顕著な酸化層が生成しなくても効果的に工具摩耗が抑制される場合あるいは酸化層が生成しても工具摩耗が抑制されにくい場合が認められるのは興味深い。同一脱酸法で溶製した M-3、および M-3\* 鋼は類似した切削挙動を示している。

Fig. 3 は切削時の超硬工具すくい面上の酸化層厚さおよびクレータ摩耗深さに及ぼす鋼中の  $\Sigma O$  量の影響を示す。概して鋼中の  $\Sigma O$  量が減少するにしたがい、酸化層が生成しにくくなることは前述のとおりであり、ま

たクレータ摩耗は増大する傾向にある。その場合に低  $\Sigma O$  量領域でクレータ摩耗に非常に大きい変動が認められるのは、その領域では鋼中の全酸素量あるいは酸化物量が一定でもその組成の調整が工具摩耗の抑制にきわめて重要であることを示唆している。

Fig. 4 は各種脱酸鋼を超硬工具で一定時間切削した後の工具面上酸化層最大厚さとクレータ摩耗の相関を示している。巨視的な酸化層が存在しなくても、すなわち酸化層がうすくても工具摩耗が効果的に抑制される場合が認められ、顕著な酸化層の生成が必ずしも工具摩耗抑制のための必要条件ではないと推定される。

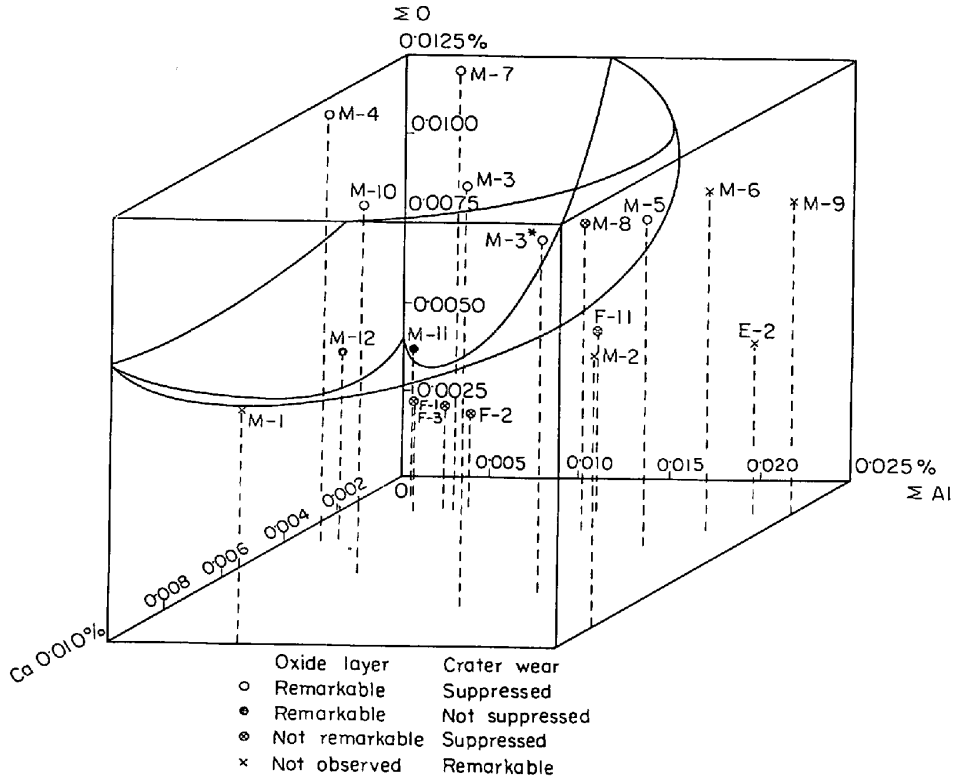
### 3.2 各種脱酸鋼の工具寿命試験結果

前節の短時間工具摩耗試験で認められた工具摩耗に及ぼす脱酸法の影響を明確に評価するために、グループ 2 およびグループ 3 の供試鋼について 3.1 と同様の方法で長時間の工具寿命試験を行ない、V-T 線図（切削速度工具寿命線図）を求めた。工具寿命判定基準はクレータ摩耗深さ  $K_T = 50\mu$  またはフランク摩耗幅  $V_B = 0.3\text{mm}$  としたが、この切削速度領域では前述のように  $K_T$  が多くの場合工具寿命を支配する。

Fig. 5 はグループ 2 の各種脱酸法で現場溶製した 0.45% C 鋼の V-T 線図である。一般に Ca-Si 合金で脱酸した鋼の工具寿命特性は他の種類の脱酸鋼の場合に比し非常に良好であり、かつ、V-T 線図の勾配が小さい。すなわち低速度側でより良好な工具寿命を示す傾向がある。

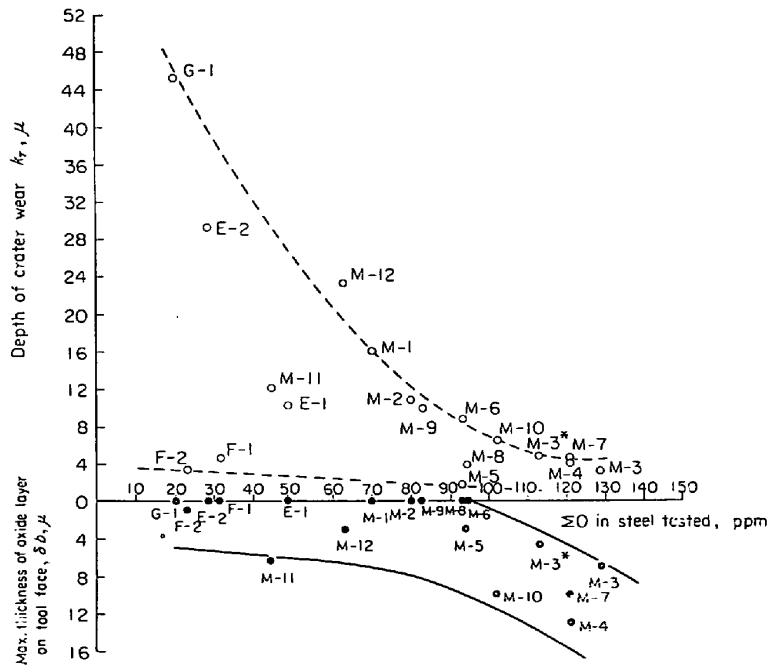
Fig. 6 は上記のような切削試験結果をもとにして、鋼のかたさと  $V_{30}$  値（30 min 工具寿命を与える切削速度）の関係をもとめたものである。Ca-Si 合金で脱酸した鋼と Ca-Si 合金+Al、もしくは Fe-Si 合金で脱酸した鋼とは明確に  $V_{30}$  値に有意差が認められる。また各グループにおいてはかたさと  $V_{30}$  値の間に負の相関がある。同一強度の鋼において、脱酸法が異なることによつて  $V_{30}$  値が約 1.5~2 倍も変化する事が認められる。

Fig. 7 は Ca-Si 合金で脱酸された鋼中の  $\Sigma Al$  量と  $V_{30}$  値の関係を示す。両者には負の相関が認められる。しかし同様の酸素水準においては Fe-Si 脱酸鋼に比し、Al を 0.030% 程度含む Ca 脱酸鋼のほうが少し被削性がすぐれている点には留意する必要がある。第(1)式は Ca 脱酸した E 系列および F 系列の鋼の工具寿命試験結



(Tool : P10 (-5,-5,5,5,15,15,0.5), Cutting speed : 200m/min, Feed : 0.25mm/rev., Depth of cut : 1.5mm, Cutting time : 10min, Dry cut)

Fig. 2. Relation between Ca-,  $\Sigma$ Al,  $\Sigma$ O-contents in 0.45%C steel and formation of oxide layer on tool face in cutting steels with sintered carbide tools.



(Cutting condition : same as Fig. 2)

Fig. 3. Effect of oxygen content in steel tested on crater wear and formation of oxide layer on tool face.

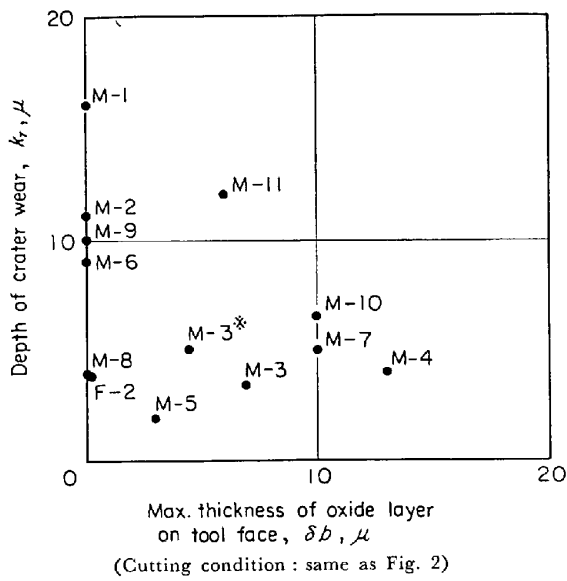


Fig. 4. Relation between thickness of oxide layer and crater wear.

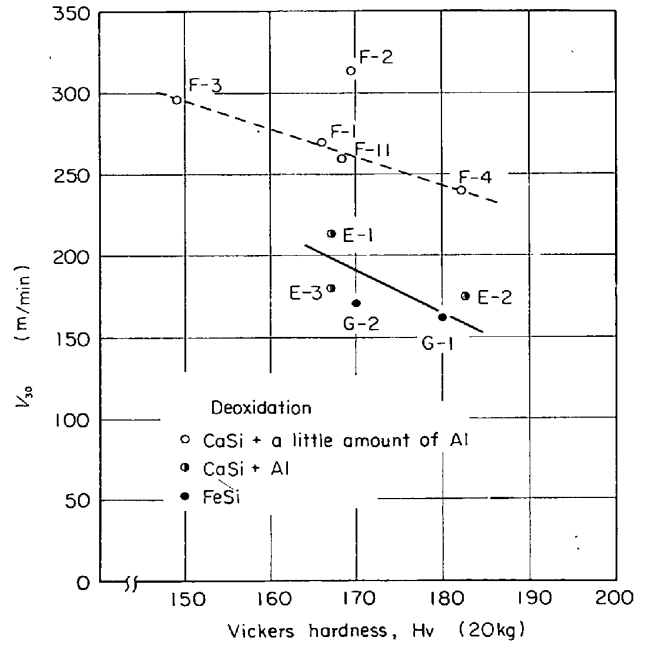


Fig. 6. Effect of hardness on tool life characteristic of various 0.45%C steels tested.

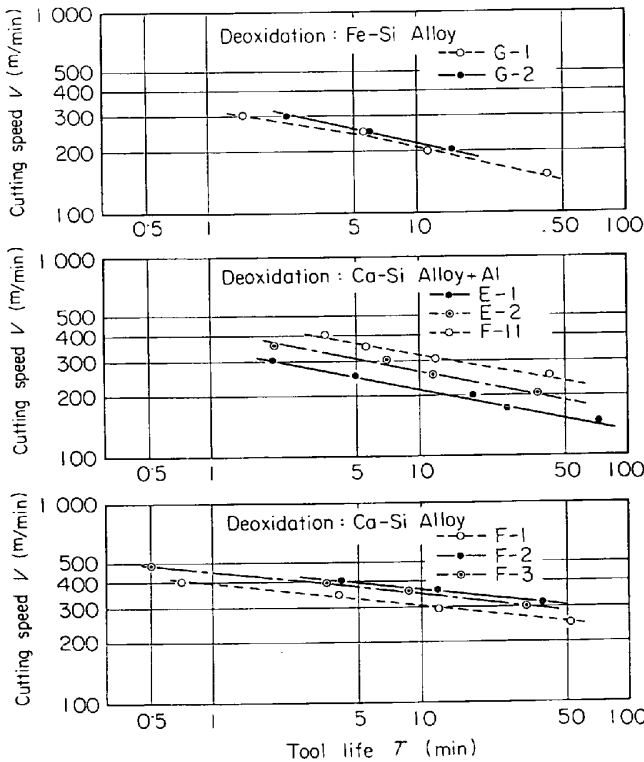


Fig. 5. Tool life characteristics of various 0.45C steels tested.

果をもとにして1次式な関係を仮定してかたさ Hv,  $\Sigma$  Al 量に対する  $V_{30}$  値の回帰平面を求めたものである。

$$V_{30}(\text{m/min}) = 516 \cdot 0 - 3110 \cdot \Sigma \text{Al}(\%) - 1.36 \text{Hv} \quad \dots \dots \dots (1)$$

その場合の重相関係数は 0.866 である。かたさに代表される鋼の機械的性質に対して  $\Sigma$  Al 量に代表される鋼中

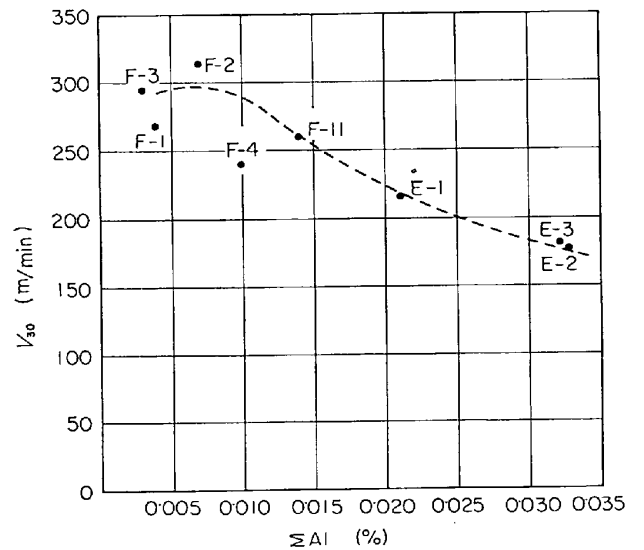


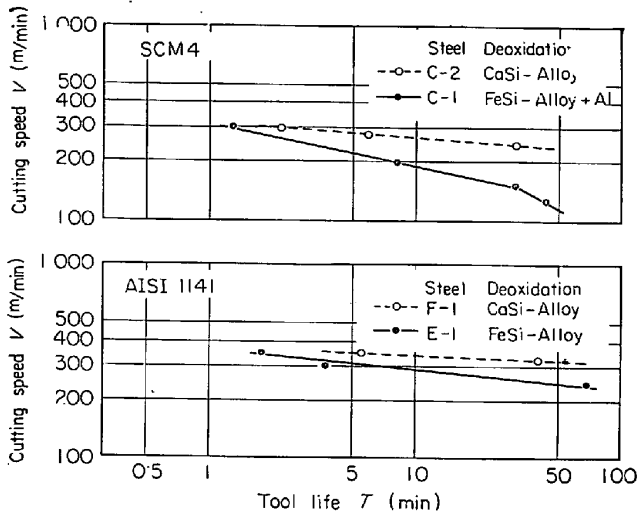
Fig. 7. Effect of Al content in Ca-deoxidized steels on their tool life characteristics.

の脱酸生成物の状態が超硬工具による切削時の工具寿命特性に非常に大きく寄与していることが認められる。

このような脱酸法による脱酸法による被削性の変化が他の合金元素の影響を受けるかどうかを確かめるために、Cr-Mo 鋼 SCM4, ならびに硫黄系快削鋼 AISI 1141 について同様の試験を行なった。Fig. 8 はその試験結果である。同図から明らかなように、両鋼種においても Ca-Si 合金による脱酸が工具寿命特性の改善に非常に効果的であることがわかる。なお、図中の矢印のついた実験点は顕著な付着物が工具面上に生成し、工具摩耗が進行しないことを示している。

3.3 各種脱酸鋼の切くず生成挙動

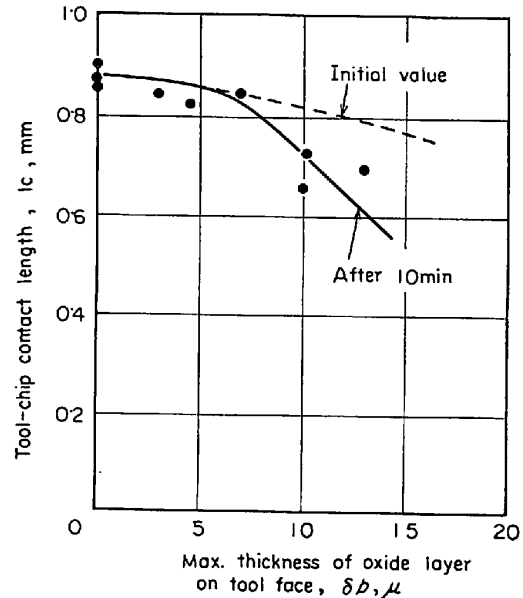
以上述べたように、Ca-Si 合金で脱酸した鋼を超硬工具で切削する場合に、通常脱酸鋼に比し工具寿命特性が顕著にすぐれているが、いつぼう、他の切削特性が脱酸法の影響を受けるかどうかということは議論のあるところである。そこで当研究においては切くず生成挙動に及ぼす脱酸法の影響を明らかにするために、供試鋼として



(Cutting condition : same as Fig. 5)

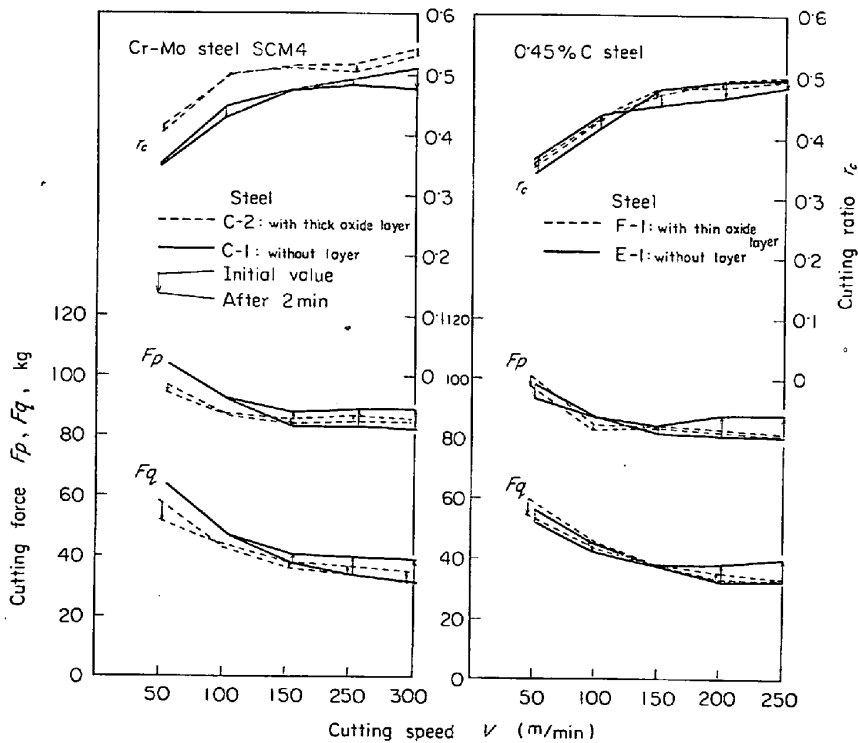
Fig. 8. Effect of deoxidation on tool life characteristics of low alloy steel and resulfurized steel.

顕著な酸化物層が生じ工具摩耗の抑制される C-2 鋼 (3.4 参照), 顕著な酸化物層は生じないが工具摩耗が効果的に抑制される F-1 鋼, およびそれぞれの比較のための酸化物層が生成せずクレータ摩耗が進行しやすい C-1, E-1 鋼をとりあげ, P10 工具で長手旋削を行な



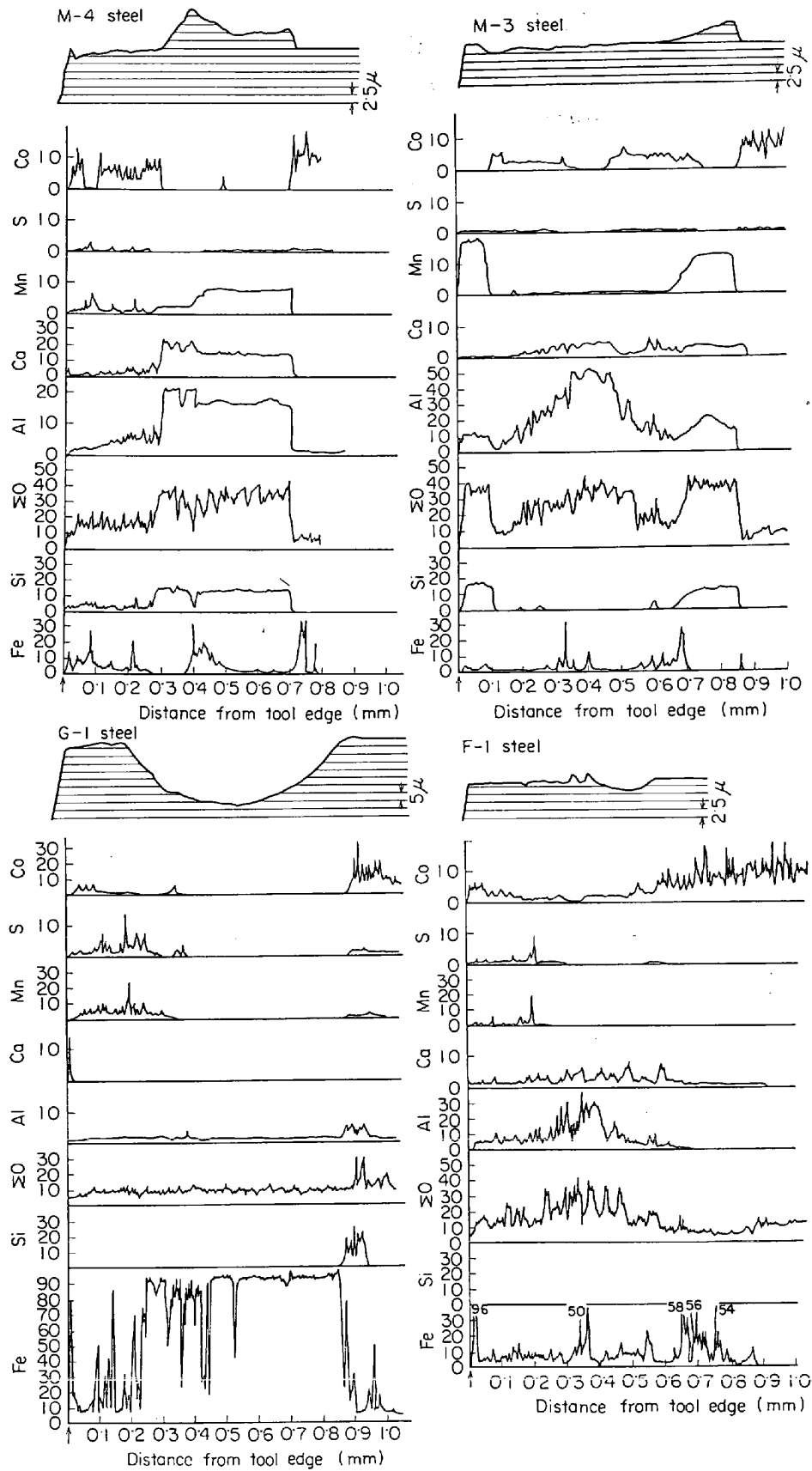
(Cutting condition : same as Fig. 2)

Fig. 10. Relation between thickness of oxide layer and tool-chip contact length.



(Cutting condition : same as Fig. 1)

Fig. 9. Effect of oxide layer formation on cutting force and cutting ratio in machining of various steels with carbide tools.



(Cutting condition : same as Fig. 2)

Fig. 11. Analysis of oxide layers on tool faces with EPMA.

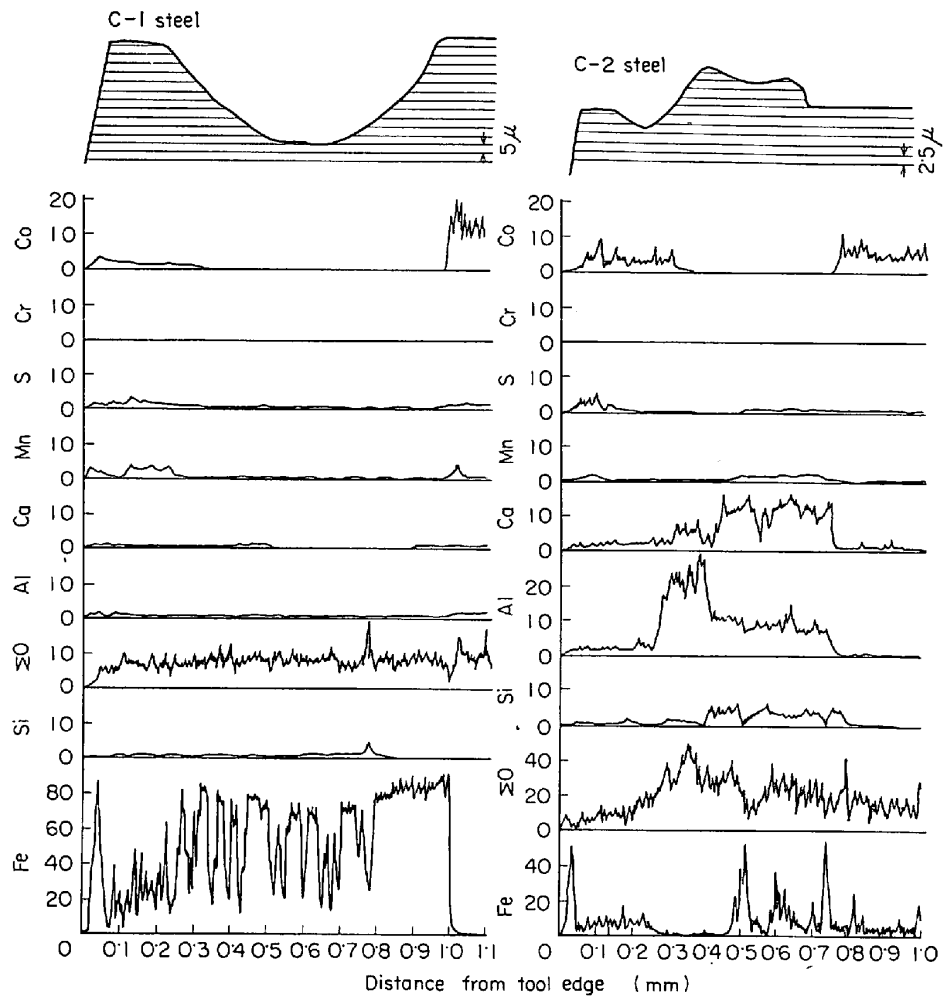


Fig. 12. Analysis of oxide layers on tool faces with EPMA.

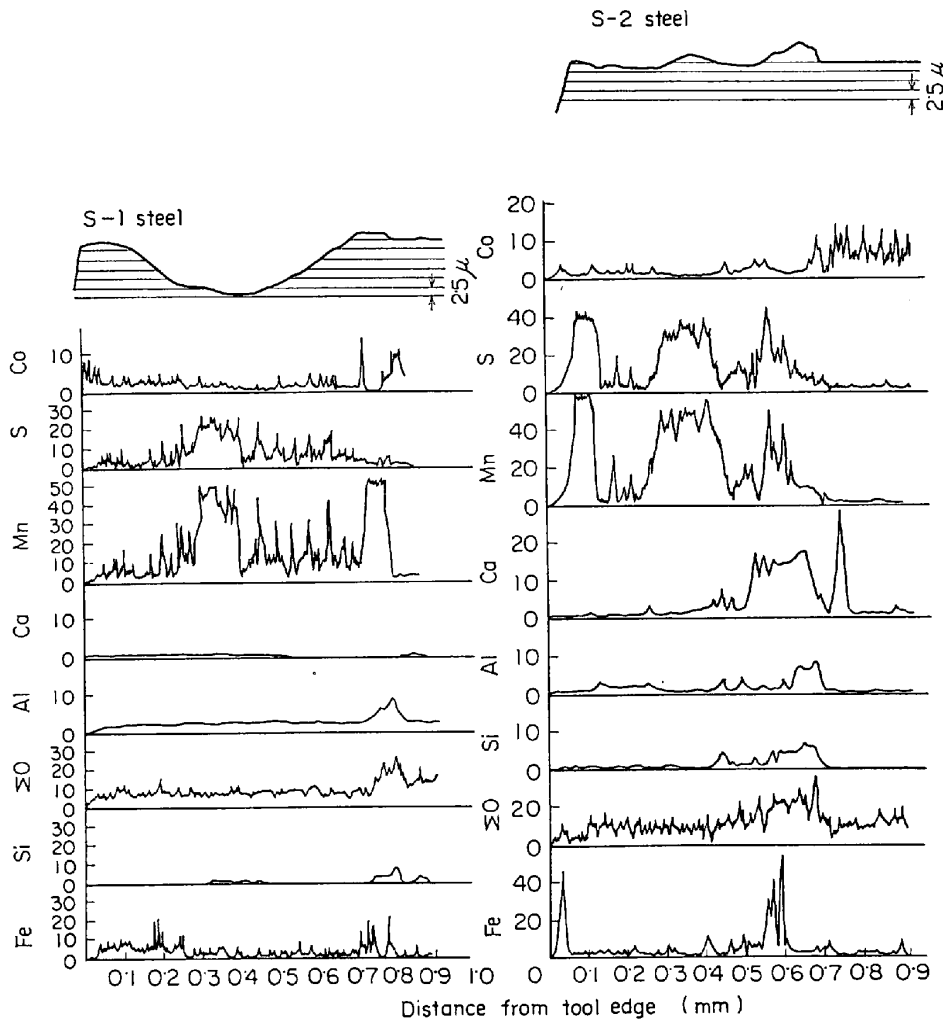
い、切削抵抗および切削比を測定した。ここに切削比  $r_c$  とは変形前切くず厚さ（通常の旋削では送り）を切くず厚さで除した値である。切削抵抗の測定には機械試験所式切削動力計を使用した。測定に際しては Fig. 1 に示すような酸化物層の成長状況を考慮して、切削直後および切削開始 2 min 後の特性を求めた。Fig. 9 にその測定結果を示す。図中、 $F_p$  は主分力、 $F_q$  は送り分力である。

切削開始 2 min 後の測定値に関しては KÖNIC の結果（その場合は切削開始 3 min 後）<sup>7)</sup> によく対応しており、酸化物層の存在は切削抵抗を低下させる傾向を示している。しかし、ここで注意しなければならないのは切削抵抗、あるいは切削比の時間変化ならびに酸化物層生成状態との対応である。

同図から明らかなように、切削抵抗、切削比の時間変化は各鋼とも脱酸法の相異にかかわらず切削速度が約 100m/min を境にして傾向を異にし、低速側では切削時間とともに切削比は上昇、切削抵抗は減少する傾向があるのに対して、高速側では切削比は低下、切削抵抗は増

大するようである。その場合に、低速側での特性は時間変化が小さく、酸化物層が顕著に生じる C-2 鋼では後述するように低速域でもうすい酸化物層（硫化物を含む）の存在が認められ、切削抵抗も酸化物層の生じにくい鋼に比し低い水準にあるが、酸化物層が顕著に生じないでかつ工具摩耗が効果的に抑制される F-1 鋼では比較鋼との間に有意差は認められない。いずれにしても切削時間ともなう切削抵抗の減少はその速度域において生じる酸化物あるいは硫化物層が工具一切くず間のすべり抵抗を減じることによると考えても大過ないであろう。いつぼう、高速側では酸化物層厚さの大小にかかわらず、酸化物層の有無が切くず生成挙動に有意な影響を及ぼし切削開始直後は酸化物層の生成する Ca-Si 合金で脱酸した鋼ならびに比較鋼とも同様の挙動を示すのに対して切削時間の経過とともに前者には変化はないが、後者は切削抵抗がかなり増大し、切削比が低下する傾向にある。Fig. 10 は各種脱酸を行なった鋼を切削する際の工具面上に生ずる酸化物層最大高さとして工具一切くず接触長さの関係を示している。図中破線は切削開始直後の推定





(Cutting condition : same as Fig. 2)

値、実験点は切削開始10 min後の測定値を示している。工具一切くず接触長さの決定は工具顕微鏡による観察、万能表面形状測定機で求めた工具表面のプロファイル、X線マイクロアナライザ (E PMA) による線分析をもとに行なつたが、切削開始直後の値には不確かさを含んでいるので推定値として破線で示している。同図から認められることは切削開始直後は酸化物層の生成しやすさに影響されず工具一切くず接触長さに大きい差はないと推定されるが、切削時間が長くなり酸化物層厚さが大になる場合には工具一切くず接触長さが減少する傾向が認められる。このような傾向は KÖNIG の報告<sup>7)</sup>と合致している。しかし、KÖNIGが論じているような、接触長さが減少するために切削抵抗が減少するという議論はそのままでは受け入れられない。なぜならば、それは切削抵抗の時間変化ならびに非常にうすい酸化物層しか生ぜず、接触長さにほとんど有意差のない場合にも同様の現象が生ずることを説明しえないからである。

このような高速領域における鋼の切くず生成挙動に及

ぼす酸化物層の影響は低速域におけるような積極的な寄与として考えるよりは、むしろ、工具表面の摩耗による活性な面の生成とそれにもとづく切くずとの強い凝着を妨げる働きとして考えるほうが妥当ではないかと思われる。これは後に 3・4 で述べるような酸化物層が生じない鋼を切削する際には工具に Fe が凝着しやすい傾向があることと矛盾しない。また工具摩耗速度との対応を考える上で興味深いことと考えられる。もちろんこの現象をよりよく理解するためには酸化物層生成あるいは工具摩耗による工具形状の変化もあわせて考える必要があるが、詳しい議論は別の機会にゆずりたい。

### 3・4 工具面上酸化物層の検討

以上述べたように、超硬工具を用いての鋼切削時の挙動は脱酸法の影響を強く受けるが、これは鋼中の残留脱酸生成物およびそれによる工具面上酸化物層の生成状態と強く関係していることは疑問の余地がない。鋼中の残留脱酸生成物とそれら挙動との関係は本報ではふれないが、以下では各供試鋼切削時の工具面上酸化物層生成状

態を検討する。

Fig. 11 は各種脱酸を行なった中炭素鋼を一定切削条件で切削後の工具面のプロフィールと EPMA による工具面上付着物線分析結果の例を示す。測定条件は多くの場合加速電圧 20kV, 試料電流  $0.058\mu\text{A}$  とした。また工具表面の不規則な形状ならびに付着物層がうすいことなどから定量補正は行なっていないので、定性的な情報として以下では検討を行なっている。

M-4 鋼は顕著な酸化物層が生成し、工具摩耗が抑制されている例であるが、その場合、全工具一切くず接触領域において  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}$  系の複酸化物の厚い層が認められる。いつぼう、M-3鋼の結果は工具一切くず接触領域において、場所によつて酸化物層の組成が大幅に変化している例である。すなわち、比較的切削温度の低い工具一切くず分離端および刃先近くではM-4鋼と同様の  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}$  系の酸化物層が生成しているが、切削温度の高い工具一切くず接触領域中央部では  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  量の非常に高い酸化物層が生成していることが認められる。このことは鋼中に分布する各種酸化物および複酸化物が工具一切くず接触面の温度あるいは圧力にしたがつて選択的に工具面に付着しうることを示している。F-1 鋼は工具面に酸化物層が顕著には生成しないが工具摩耗が効果的に抑制された例であつて、工具面上に高  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  組成のうすい酸化物層が存在していることが認められる。G-1 鋼は Fe-Si 合金で脱酸した鋼で、酸化物層が生成せず、工具摩耗が顕著に進行しているが、この場合には工具面に Fe が明りように付着している点に留意すべきである。

一般に酸化物層中に占める  $\text{SiO}_2$  あるいは  $\text{MnO}$  の量が多いほど、また  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  の量が少ないほど酸化物層が成長しやすい傾向が見られるが、これは DIEDE-  
RICH の報告<sup>11)</sup>と一致している。しかし、前述のように酸化物層が顕著に生成しなくても工具摩耗が抑制されることも事実であつて、そのような場合にはうすい酸化物層の存在が認められ、Fe の付着は妨げられている。Fe-Si 脱酸鋼あるいは Ca-Si 脱酸鋼でも Al 量の高い鋼のように工具摩耗進行速度の高い場合には G-1 鋼の例が示すようにほとんど例外なく工具面に Fe が付着しやすい。

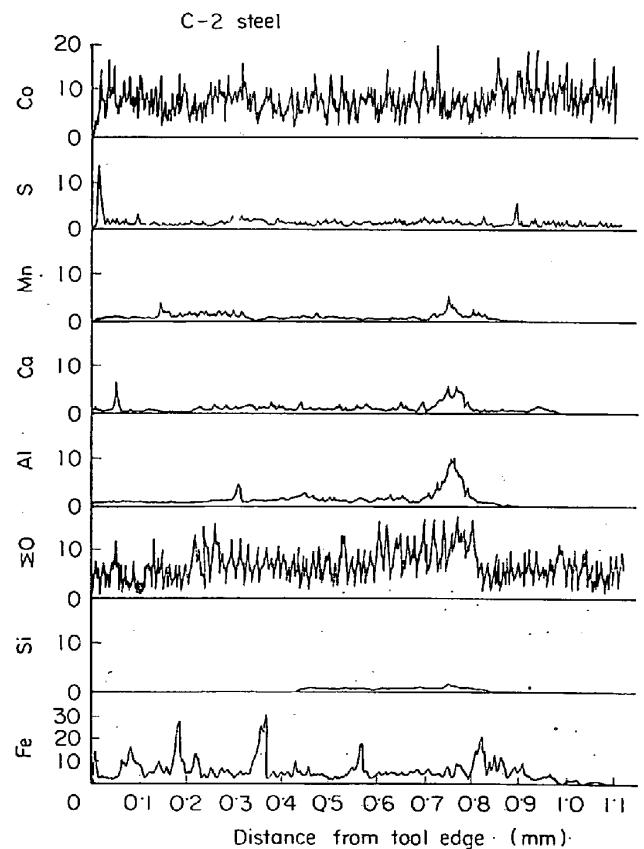
このような傾向は F-1 鋼切削時に見られるようなうすい酸化物層が工具一切くず間の C などの拡散、移行に起因する摩耗を効果的に抑制しうることの間接的な証拠とも考えられる。

酸化物層組成と工具摩耗速度の間的相关については多くの研究がなされているが、うすい酸化物組成の定量分

析が困難なこと、酸化物層厚さと工具摩耗の間に必ずしも対応がないこと、酸化物層組成が工具面上の位置によつて大幅に変化しうることなどから明確な結論は現状では下し難いようで、今後さらに詳細な検討が必要である。

他の合金元素の影響に関しては Fig. 12 に示すが、SCM4 鋼のような 1% 前後の Cr の存在、したがつて比較的微量の  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  の存在は酸化物層生成ならびに工具摩耗挙動にほとんど影響せず、また工具面上酸化物層にも  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  の富化は認められなかつた。S あるいは MnS の影響については、Fe-Si 脱酸鋼および Ca, Si を含む合金で脱酸した鋼ともかなり高速域まで工具面上に MnS の存在が認められる。そして前者においては MnS そのものは工具摩耗抑制に積極的に寄与しているとは必ずしも考えられないが、後者においては MnS の存在が工具面上付着物層の生成および工具摩耗抑制を促す傾向もあるようである。

切削速度の影響に関しては必ずしも KÖNIG の報告<sup>12)</sup>のような傾向を示すとは限らず、50m/min 程度の低速域でも酸化物層の生成がしばしば認められる。Fig. 13は



(Cutting speed : 50m/min  
Other cutting condition : same as Fig. 2)

Fig. 13. Analysis of oxide layer on tool face with EPMA.

その例を示している。

#### 4. 結 言

Ca 脱酸快削鋼に関連して、鋼を超硬工具で切削する場合の被削性に及ぼす脱酸法の影響を調査し、現象論的に以下のような傾向を明らかにした。

(1) 切削時に工具面上に酸化物層の生成する傾向は鋼中の  $\Sigma O$ ,  $\Sigma Al$ ,  $\Sigma Ca$  量とある程度の対応があり、高  $\Sigma O$  量側ではかなり広範な  $\Sigma Al$ ,  $\Sigma Ca$  量の鋼において酸化物層の生成が認められ、工具摩耗が抑制される。 $\Sigma Al$  量は高くなるにしたがつて酸化物層が生成しにくくなる。 $\Sigma Ca$  量も高すぎるとかえって酸化物層の生成を妨げる場合がある。

(2) 顕著な酸化物層の生成は工具摩耗抑制のための十分条件ではあるが、必ずしも必要条件ではない。というのは非常にうすい酸化物層しか生じない場合でも効果的に工具摩耗が抑制されうるからである。

(3) 鋼中の  $\Sigma O$  量と酸化物層最大厚さとは広範な脱酸条件の鋼において正の相関があるようであるが、酸化物層最大厚さと工具摩耗の間の相関は弱い。

(4) Ca, Si を含む合金で適正に脱酸されたいわゆる Ca 脱酸快削鋼を超硬工具で切削する際の工具寿命特性は非常に良好で、従来の Fe-Si 脱酸鋼あるいは Ca-Si 合金で脱酸しても  $\Sigma Al$  量の高い鋼に比し  $V_{30}$  値で 1.5~2 倍にも達する。

(5) Ca, Si を含む合金で脱酸された鋼中の  $\Sigma Al$  量と  $V_{30}$  値の間には明りような負の相関がある。

(6) 工具面上の酸化物層の生成は切くず生成挙動にも影響を与え、Ca 脱酸快削鋼では従来鋼に比し切削抵抗は減少する傾向がある。この傾向は切削開始直後よりも切削時間の経過とともに顕著になる。

(7) このような Ca-Si 合金による脱酸の効果は炭素鋼のみならず、Cr を含む低合金鋼、硫黄快削鋼にも同様にあらわれる。

(8) 酸化物層組成と酸化物層の成長しやすさとは対

応があるようではあるが、工具摩耗状況とは必ずしも対応が認められない。

(9) 酸化物層は 50m/min 程度の低速域でも認められる。

なお、脱酸条件と鋼中の残留脱酸生成物との対応、鋼中の酸化物と工具摩耗との関係ならびに工具摩耗抑制の機構などに関しては次の機会に検討したい。

終わりに、本実験にあたり種々助言、協力していただいた(株)神戸製鋼所中央研究所藤田達氏、牧野武久氏、萩原康禎氏、神戸工場山上徹氏はじめ関係諸氏に深く感謝します。

#### 文 献

- 1) H. OPITZ and G. OSTERMANN: Stahl u. Eisen, 79 (1959) 8, p. 514
- 2) H. OPITZ and W. KÖNIG: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962) 12, p. 831
- 3) H. OPITZ, M. GOPPISCH, and W. KÖNIG: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962) 12, p. 841
- 4) H. OPITZ et al.: Stahl u. Eisen, 83 (1963) 20, p. 1209
- 5) W. KÖNIG: Industrie Anzeiger, 87 (1965) 26, p. 463
- 6) W. KÖNIG: Industrie Anzeiger, 87 (1965) 43, p. 845
- 7) W. KÖNIG: Industrie Anzeiger, 87 (1965) 51, p. 1033
- 8) A. WICHER and R. PAPE: Stahl u. Eisen, 87 (1967) 20, p. 1169
- 9) A. WICHER and R. PAPE: Stahl u. Eisen, 87 (1967) 21, p. 1267
- 10) E. SCHMEER: Arch. Eisenhüttenw., 39 (1968) 4, p. 227
- 11) N. DIEDERICH: Doktor-Ingenieurs Dissertation, T. H. Aachen, 1968
- 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