カルシウム脱酸鋼切削時の工具面付着物の挙動*

平 尾 政 利** 西 川 勝 彦*** 佐 田 登 志 夫†

The Behavior of the Thin Film on the Tool Face in Cutting Calcium Deoxidized Steel

Masatoshi HIRAO, Katsuhiko NISHIKAWA, Toshio SATA

This paper describes the behaviors of the built-up thin film on the tool face in cutting of calcium deoxidized steel. The effect of constitution of Ca, Al, and S contents on formation of the built-up thin layer is examined by cutting the steel the wide range of the cutting conditions. It is found that the too temperature at the maximum height of the built-up layer is proportional to the melting point of the oxide inclusion. Formation of the layer depending on cutting conditions is also explained by above the relation.

1. ま え が き

Ca 脱酸鋼を切削すると、工具面に良好な作用を及ぼす付着物が工具すくい面、逃げ面上に生成する。この付着物が生成する冶金学的条件および切削条件については今日までに多くの報告^{1)~5)}がある。これらの報告を検討した結果、付着物生成には鋼中の酸化物系介在物が大きく寄与することが明らかになった。本報告においては種類の組成の介在物をもつ Ca 脱酸鋼および S を添加した Ca 脱酸鋼について、その切削時の工具面付着物の生成条件を観察し、またその生成条件と介在物の融点との関連について検討した。さらに工具面に付着物が生成する場合、付着係数という概念を導入すると同時に工具面付着物のプロフィールについても検討を加えた。また鋼中の酸化物系介在物と工具寿命曲線との関連についても検討した。以下実験結果および検討について報告する。

2. 実 験 方 法

切削実験に用いた被削材は構造用炭素鋼 S45C を基本ベースにしているが、鋼中の成分である Al, Ca, S を広範囲に変えているため、Al, Ca, S の量によってグループ分けをして整理し、その代表的な被削材の化学成分を表 1 に示す。この場合、S の普通レベルのもの ($\leq 0.035\%$)、S の高レベルのもの ($> 0.035\%$)、Al の高低、さらに Ca の有無により、MS-1~MS-6, HS-1~HS-8 のグループに分けて整理した。ここで MS 鋼は S 量が 0.035% 以下の鋼であり、HS 鋼は S が 0.035% を越える鋼で、 $0.04\sim 0.06\%$ 程度と若干 S の高い鋼である。また MS 鋼

のうち No. 1, No. 2, No. 3 は Ca を添加していない鋼で、No. 4, No. 5 は Ca を添加した鋼であり、それぞれについて Al のレベルで分類した。

同様に HS 鋼のうち No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 は Ca を添加していない鋼で、No. 5, No. 6, No. 7, No. 8 は Ca を添加した鋼であり、それぞれ Al のレベルによって分けてある。

以上の被削材は低周波炉で溶製した後、焼ならし処理を行っている。

また表 2 には送り、切削速度を変えた別の切削実験に用いた構造用炭素鋼 S45C で Ca-Si 脱酸したものおよび Ca-Si 脱酸をし、S を加えた被削材の化学成分を示す。表 2 に示された被削材は、上吹転炉で溶製し、 870°C で 1 時間加熱焼準を行っている。以上のようにして作製した被削材を高速旋盤を用いて、超硬合金工具で丸棒の長手方向旋削を行った。使用した工具は $(-5, -5, 5, 5, 0, 0, 0, 4)$ の形状の片刃バイトで工具材種は P20 である。切削条件は切込み 2mm の一定とし、送りを $0.15\sim 0.35\text{ mm/rev}$ 、切削速度を $50\sim 400\text{ m/min}$ まで変化させた。

工具面付着物の観測には触針をつけた精密ダイヤルゲージを用いて工具面をトレースし、その最高値と工具表面高さとの差をもって付着物層の最大厚さとした。また付着物層のプロフィールの観測には触針式あらさ計を用いた。このほかに工具-被削材熱電対法による工具面温度の測定を行った。

3. 実 験 結 果

3.1 鋼の化学成分と介在物の組成、融点

工具すくい面上に生成する付着物の組成は鋼中の酸化物系介在物の組成に比較的近い値となっている⁶⁾。

このような観点から付着物生成に直接関与していると考えられる鋼中の非金属介在物について検討した結果を

* 原稿受付 昭和 49 年 4 月 11 日。昭和 49 年度精機学会春季大会学術講演会(昭和 49 年 4 月 5 日)にて発表。

** 学生会員 東京大学工学部(東京都文京区本郷 7-3-1)

*** 正会員 日本鋼管(株)(川崎市川崎区南田町 2730)

† 正会員 東京大学工学部

表1 被削材の化学成分 (%)

(機械構造用炭素鋼 JIS S 45 C 相当)

グループ	S	Ca	sol. Al	C	Si	Mn	P	S	sol. Al	Ca	O	SiO ₂	Al ₂ O ₃
MS-1	≤0.035	なし	≤0.003	0.41	0.25	0.68	0.010	0.017	0.001	tr	0.005 0	0.001	0.002
MS-2			0.004~0.010	0.41	0.28	0.68	0.017	0.022	0.008	tr	0.002 9	0.002	0.008
MS-3			≥0.011	0.49	0.32	0.72	0.019	0.023	0.021	tr	0.004 3	0.003	0.008
MS-4		あり	≤0.003	0.41	0.18	0.74	0.012	0.017	0.001	0.004 3	0.003 8	tr	0.002
MS-5			0.004~0.010	0.42	0.23	0.66	0.009	0.011	0.005	0.010 1	0.010 1	0.003	0.001
MS-6			≥0.011	0.44	0.29	0.73	0.020	0.019	0.026	0.006 7	0.002 8	0.002	0.006
HS-1	>0.035	なし	≤0.003	0.43	0.30	0.76	0.006	0.053	tr	tr	0.004 8	0.009	0.008
HS-2			0.004~0.010	0.40	0.28	0.77	0.005	0.039	0.004	0.001 3	0.005 7	tr	0.019
HS-3			0.011~0.020	0.41	0.28	0.80	0.005	0.046	0.018	0.001 6	0.008 0	tr	0.015
HS-4			≥0.021	0.42	0.28	0.70	0.008	0.042	0.024	tr	0.006 0	0.001	0.015
HS-5		あり	≤0.003	0.44	0.28	0.74	0.007	0.051	0.002	0.007 4	0.005 1	tr	0.002
HS-6			0.004~0.010	0.38	0.27	0.78	0.008	0.062	0.006	0.005 0	0.004 6	tr	0.002
HS-7			0.011~0.020	0.42	0.26	0.72	0.010	0.036	0.020	0.005 7	0.005 5	tr	0.008
HS-8			≥0.021	0.44	0.28	0.77	0.007	0.047	0.021	0.005 7	0.003 7	tr	0.007

表2 被削材の化学成分 (%)

(機械構造用炭素鋼 JIS S 45 C 相当)

脱酸剤	化 学 成 分 (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ca	sol. Al
Ca-Si	0.42	0.29	0.82	0.017	0.020	0.004	0.006
Ca-Si+S	0.43	0.27	0.79	0.016	0.041	0.005	0.003

図1 (a), (b) に示す。両図は表1 に示した代表的な被削材について鋼中の酸化物系介在物を観察し、また EPMA

での調査を行ってみた結果である。両図にみられるように鋼中の酸化物系介在物の組成および形状は Al, Ca の量によってほぼ一義的に決まっている。図1 (a) はイオウが 0.035% 以下の場合でいわゆる中 S 鋼の代表的介在物の EPMA 写真で、その介在物の組成および融点を示している。図1 (b) はイオウが 0.035% 以上の高 S 鋼の酸化物系介在物の同様な例である。ただしこれらの場合 Al として酸可容 Al(sol. Al) を用い、Ca としては全 Ca を用いている。

図1 鋼中の非金属介在物の組成、形状および融点

被削材: Ca-Si+S 脱酸鋼, 切込み: 2 mm, 工具: P 20

図2 切削速度と送りを変化させたときの付着物層の厚さ

以上示したように鋼中の酸化物系介在物の組成および融点は Al, Ca, S の量によってほぼ一義的に決定される。

3.2 工具面付着物の生成条件

Ca 脱酸鋼を切削したとき, 工具表面上には 20~50 m/min の低速度から高速度まで広い範囲にわたって付着物が生成し, 切削条件の変化に応じてその厚みが変わる。

図2は Ca-Si+S 脱酸鋼を 超硬工具材種 P 20 で切込み 2 mm の一定とし, 送りと切削速度を広い範囲に変化させ, 付着物層が完全に安定すると思われる⁵⁾ 1 km の距離だけ切削したときの付着物厚さの変化を示したものである。図にみられるように送りが一定の場合, 工具面付着物の厚さは, はじめ切削速度の上昇とともに増大してゆき, ある切削速度で最高値をとり, さらにその切削速度を越えると次第に減少してゆく。そして一定の限界切削速度を越えると工具面付着物は完全に消滅し, それとともにクレータ摩耗の発生が著しくなる。送りを変えた場合にも工具面付着物厚さと切削速度との関係は同じような山型の形状をしていて, ただこの曲線が低速度側あるいは高速度側へ移動してゆくだけである。したがって工具面付着物の厚さが最高値をとる切削速度および工具面付着物消滅の限界切削速度は送りの増大とともに低下してゆく。

4. 検 討

4.1 鋼中の非金属介在物の融点と工具面付着物生成温度との関連

図2の結果にみられるように工具面付着物の生成あるいは鋼中の介在物の工具摩耗防止効果は切削速度, すなわち切削温度に大きく影響されていると考えられる。この点をさらに定量的に検討するために図2に示したような実験条件(工具面付着物の最高厚さを示す切削条件および工具面付着物の消滅する切削条件)における工具面温度を計算した。この計算は Chao, Trigger⁷⁾ による工具面理論温度分布を数値積分することにより求めたものである。このようにして求めた工具面温度と図1(a), (b)に示した介在物の融点を考慮して次式に示すような実験

図3 温度変化による付着係数の変化

式的なモデル式を考案した。ただし付着係数の最大値である $F(\theta)=1$ は図2に示した送り 0.25 mm/rev の条件のとき工具面付着物の最高厚みをとる切削条件(この場合切削速度 200 m/min)を切削温度に置きかえ, また付着係数の最小値である $F(\theta)=0$ は工具面に付着物が生成しない切削条件(この場合切削速度 300 m/min)を同様に処理し, これらを三次元近似したものである。

$$\theta \leq \theta_c$$

$$F(\theta) = -0.6195 + 0.1936 \times 10(\theta + \theta_c) - 0.2003 \times 10^{-2}(\theta + \theta_c)^2 + 0.6868 \times 10^{-6}(\theta + \theta_c)^3 \quad (1)$$

$$\theta > \theta_c$$

$$F(\theta) = 0.1156 \times 10^3 - 0.5862 \times 10^{-1}(\theta - \theta_c) + 0.9261 \times 10^{-4}(\theta - \theta_c)^2 - 0.4503 \times 10^{-7}(\theta - \theta_c)^3 \quad (2)$$

$F(\theta)$: 付着係数

θ : 切削温度 (°C)

$$\theta_c = 0.591 \times MP \text{ (°C)}$$

MP: 酸化物系介在物の融点 (°C)

付着物を生成する MS 鋼の場合の代表的な介在物である $SiO_2=50\%$, $Al_2O_3=5\%$, $CaO=45\%$ (融点 1480°C) と付着物を生成しない $Al_2O_3=100\%$ (融点 2020°C) の付着係数のグラフを図3に示す。図3にみるように付着係数は温度により大きく変動すると同時に介在物の組成によっても変化している。モデル式からも理解できることであるが融点の約 60% の温度の時, 付着係数は最大となっている。以下このモデル式を使用して工具面付着物について検討する。

4.2 工具面付着物の生成と切削条件との関連

表1に示した被削材のうち Ca 脱酸鋼について前述のモデル式を応用した結果を図4(a), (b)に示す。

図4(a)は MS 鋼の結果で, 図4(b)は HS 鋼の結果である。両図とも横軸は実験によって付着物の生成する切削速度であり, 縦軸はモデル式から求めた切削速度である。両図にみられるように MS 鋼および HS 鋼の両切削速度ともほぼ 45° の直線にのり, モデル式および切削実験の結果は良い一致をみている。

(a) $S < 0.035\%$ (b) $S > 0.035\%$

切込み: 2 mm, 送り: 0.25 mm/rev, 工具: P 10

図4 モデル式による付着物生成と切削実験の結果

次に送りを変化させた時、このモデル式による判別と切削実験の結果を比較するため表2に示したCa脱酸鋼についての実験結果を図5(a), (b)に示す。図5(a)はCa-Si脱酸鋼の結果であり、図5(b)はSを添加したCa-Si+S脱酸鋼の結果である。

両図にみるように付着物の消滅する切削条件はモデル式による判別および切削実験ともよく一致している。

しかし付着物の最高厚みを与える切削条件は図5(a)のCa-Si脱酸鋼の結果にみられるように送り0.15mm/rev, 切削速度250 m/minで一致しているが、送りの上昇および切削速度の低下に従いモデル式による結果と切削実験の結果はずれている。しかしその切削速度のずれは最大で約50 m/min程度である。

一方、Sの添加されたCa-Si+S脱酸鋼の結果である図5(b)において付着物の最高厚みを与える切削条件はほぼ一致しているが、切削速度が上昇し送りが低下するに従いモデル式による判別と切削実験の結果はわずかにずれてくるが、かなりよい一致をみている。

(a)

(b)

切込み: 2 mm, 工具: P 20

図5 送りを変化させたときのモデル式による付着物生成と切削実験の結果

切込み: 2 mm, 送り: 0.25 mm/rev, 工具: P 20

図6 鋼中の介在物組成による工具寿命曲線の変動

4.3 鋼中の介在物と工具寿命曲線

工具面付着物の生成によって工具寿命曲線にも影響が現れる。例えば図6は表1のHS鋼のNo.5, No.6, No.7についての工具寿命曲線である。この図からわかるように切削速度200 m/minの条件ではNo.5, No.6, No.7の順で工具寿命は長い、切削速度300 m/minになるとこの順序が逆転してNo.7が長く、No.5が短くなって

いる, この点を検討するためにこれらの被削材の鋼中の介在物を見ると No. 5 の場合, $\text{SiO}_2=38\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=8\%$, $\text{CaO}=54\%$ の組成を持ち, その融点は 1500°C であり, No. 6 の場合 $\text{SiO}_2=31\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=26\%$, $\text{CaO}=43\%$ の組成で, その融点は 1530°C である. また No. 7 の場合, $\text{Al}_2\text{O}_3=80\%$, $\text{CaO}=20\%$ の組成でその融点は 1780°C である.

切削速度の上昇は切削温度の上昇を意味しており, 鋼中の酸化物系介在物の融点と工具寿命線図の入れかわりを検討してみると高温度の融点をもつ介在物は低温度の融点をもつ介在物より, より高温において工具寿命を改善していることがわかる. すなわち鋼中の介在物はある特定の温度領域において工具摩耗を減少させていると推察される.

また MS 鋼の場合も HS 鋼の場合と同様に切削速度の上昇により工具寿命が逆転しており, 鋼中の介在物の融点に関連したある温度域で工具摩耗を減少させている.

また, アルミナ 100% の介在物の場合, その融点は 2020°C であり, 付着物は全然生成しない. しかしアルミナ 100% の介在物の場合, 低切削速度領域において工具摩耗に悪影響を及ぼすが高切削速度になるにつれ, その影響は少なくなってくる*.

以上の事実から高融点をもつ介在物は高切削速度領域すなわち切削温度の高い領域において工具すくい面に対し何らかの作用を及ぼしているが, 工具材質の融点, あるいは切りくずと工具材質との拡散等により全体としては工具摩耗が著しく進行するものと考えられる.

4.4 工具すくい面における付着物層のプロフィルと温度分布

ここで工具面に生成する付着物厚さのプロフィルについて検討する. 鋼中の介在物が工具面に付着する付着係数は図 3 に示すように温度によって上昇し, ある温度以上になると減少してくる. 付着係数が上昇する過程は $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系の介在物が温度上昇に従い活性化し, 軟化してくる過程と考えられる.

一方, 付着係数が下降する過程は他の組成をもつ場合の報告⁸⁾ にもあるように $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系の介在物が温度の上昇に従いその粘性が低下してくる過程と考えられる.

工具すくい面の温度分布を計算し, 式 (1), (2) に示したモデル式から付着係数を求め, それをもとにし工具すく

切削速度: 150 m/min, 送り: 0.25 mm/rev, 切込み: 2 mm, 被削材: Ca-Si 脱酸鋼

図 7 付着物層プロフィルの計算および実験の比較

い面上の付着物層のプロフィルを計算することができ

る. このようにして求めたプロフィルと切削実験により求めた結果を図 7 に示す.

図 7 は Ca-Si 脱酸鋼を切削速度 150 m/min, 送り 0.25 mm/rev の条件で 0.3 mm 切削したときの結果である. 図にみられるように計算により求めたプロフィルと実験結果によるプロフィルは比較的よい一致をみている. ただ付着物層厚みの最高位置は実験結果の方が計算結果よりも後方に位置している.

5. 結 論

以上の実験および検討の結果より次の結論が導かれる.

- (1) 酸化物系介在物の組成, 融点は Al, Ca, S 量によりほぼ一義的に決定される.
- (2) 工具面付着物の最高生成条件を与える工具面温度は介在物の融点に比例しており, 介在物融点の 0.591 のとき工具面付着物は最高厚みをとる.
- (3) 工具面付着物を生成する切削速度は送りの上昇とともに減少してゆくが, この関係は上の関係式より求めた計算結果とよい一致を示している.
- (4) 付着係数に関するモデル式を工具すくい面温度分布にあてはめることにより工具すくい面に生成する付着物層のプロフィルを求めた結果, 実験結果とほぼ一致した.
- (5) Ca 脱酸鋼において工具面付着物の工具摩耗防止効果によって工具寿命曲線の順序のいれかわりがみられる.

参 考 文 献

* 荒木・山本の実験によればアルミナを主体とする介在物の場合, 工具表面にアルミナ系介在物の付着が認められ, 工具寿命も改善される場合がある. ただし高切削速度 (200~300 m/min) の条件のときである.

- 1) 精機学会切削性分科会: カルシウム脱酸鋼の被削性 (第 1 報), 精密機械, 34, 10 (1968) 680.
- 2) 精機学会切削性分科会: カルシウム脱酸鋼の被削性 (第 2 報), 精密機械, 35, 3 (1969) 167.

- 3) 精機学会切削性分科会: カルシウム脱酸鋼の被削性 (第3報), 精密機械, 35, 4 (1969) 227.
- 4) 精機学会切削性専門委員会: カルシウム脱酸鋼の被削性 (第4報), 精密機械, 37, 5 (1971) 331.
- 5) 佐田登志夫, 平尾政利: カルシウム脱酸鋼切削時の工具面付着物の生成とその効果, 精密機械, 37, 5 (1971) 323.
- 6) 佐田登志夫, 宮下芳雄ほか: Ca 脱酸鋼の被削性, 鉄と鋼, 57, 3 (1971) 127.
- 7) B. T. Chao & K. J. Trigger: Temperature Distribution at Tool-Chip and Tool-Work Interface in Metal Cutting, Trans. ASME, 80 (1958) 311.
- 8) G. A. Soklov & A. G. Sergeev: Physical Characteristics of Slags of the System $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-Flux}$, Translated from Izvest. Vuz-Chern. Met., 13, 7 (1970) 22.

情 報

機振協の自動化機械開発賞決定

機械振興協会は第5回自動化機械開発賞の受賞者を発表した。

同賞は自動化機械の開発とその成果の実用化に貢献したものを対象とし、中小企業向けの自動化機械の開発、普及の促進を図るものである。

第5回は関係団体、学会から推せんされた68件について茨城大学の都崎雅之助名誉教授ら16名の審査員が審査、決定した。

受賞者とその業績は次のとおり。

〔企業表彰〕

▽カムレス自動盤 (宮野鉄工所) = テープもカムの取付けも不要の自動盤で、主軸駆動用に直流モータを使い、つまみ操作によるプリセットで6種の速度が任意に自動的に選べるステッピング機構である。ドッグの並べ方によってプログラムが自在に組め、段取り替えが容易である。一人で数台扱うことができ、省力化に寄与する。

▽油圧プレス機 (東和精機・愛知県安城市東栄町高根117) = シャフト類などの三次元のゆがみを自動的に直す油圧機で、被加工物のゆがみの箇所と量を検出、測定し、加工物のパターンを識別、制御信号によってプレスの際の支持点とプレス機のストロークを決めてゆがみを取る。ゆがみパターンの蓄積は各種の被加工物の矯正作業を通して行われ、プログラム整備によって多種類の軸類のゆがみ取りが自動化される。

▽ブレンドフィード付き自動射出成形機 (日精樹脂工業・長野県埴科郡坂城町南条) = 熱可塑性樹脂に各種の無機質、有機質充てん材を混練し、成形する自動射出成形機である。ホッパ下部に加熱・押込み部分、混練部分などを設けて直接成形する。未利用資源の活用にも役立つ。

▽連続蒸煮装置 (藤原醸機産業、日本九天醤油・兵庫県揖保郡揖保川町半田672) = 従来、しょう油やみその原料蒸煮はパッチ方式であったが、 1 cm^2 当たり約 1.5 kg の圧力で1~5分の短時間に蒸煮をする作業を連続自動化した。ひれ付きネットコンベア上に原料を薄層に堆積して移動させ、むら蒸しをなくす。原料利用率の向上、

排水の減少などにも効果がある。

▽プロフィールエッジ曲面サンダー (志村鉄工所・静岡県島田市宮川町2509) = 曲形くずれの問題などから手作業にたよっていた木工家具類製品の面塗装面の研磨を機械化した。被研磨材をキャタピラ上に送材させ、その側面からプロフィールエッジ曲面に走行中のサンディングペーパーの部分をプレスパットを介して接触させ研磨するプレスパットの加圧装置に空気圧クッション方式を採用して研磨効果を高めている。

▽高速ストレッチ自動包装機 (大森機械工業・東京都台東区根岸5-7-4) = 直進水平連続作動方式で、毎分約90袋のストレッチ自動包装機で、被包装物の生鮮食品を直線上で連続移行させてフィルムに延伸力を加えながら包装、耳折りなどの作業をする。これまでの包装形態の場合に比較してフィルムの使用量も少ない。

▽円筒表面傷検査装置 (三洋機工・愛知県西春日井郡西春町大字沖村字岡1) = 自動車部品のショックアブソーバのピストンロッドなど機械部品の表面欠陥を光電方式で検査する装置である。表面傷によって生ずる光量変化を電気量に変え種々のフィルタ回路を通し、S対N比を向上させ、微小傷の検出も可能にした。検査作業自動化で省力化が図れる。

〔個人表彰〕

▽全自動駒巻き機 (鳥居鉄工所社長鳥居宗一) = 絹ミシン糸、カタン糸の駒巻きまで、駒巻きの着脱、巻きつけ、満管時の糸端固定処理を自動操作する。ボビン自動供給機構におけるボビンの識別装置、巻き糸機構における糸頭巻きつけおよび糸じりの処理装置に特徴があり、駒巻き作業の合理化ができる。

〔グループ表彰〕

▽経編機の電算機システムによる自動柄出し装置 (福井県せいの工業試験場長佐々木正己ほか4名) = レースラッセル機の自動柄替え機構とコントロール機構にミニコン制御方式を導入し、柄出しを自動化した。これによって専用手作業と編機停止による稼働率の低下を解消し、容易かつ短時間の柄替えを可能にした。

(服部 敏夫)