

# 熱間工具鋼の被削性におよぼすシリコン量と潤滑油塗布の影響

海野 正英\*・瀬羅 知暁\*・岡田 康孝\*<sup>2</sup>・村上 大介\*<sup>3</sup>  
村上 禮三\*<sup>3</sup>・椿野 晴繁\*<sup>4</sup>

Effect of Silicon Content and Lubricant on the Machinability of Hot Working Tool Steel

Masahide UMINO, Tomoaki SERA, Yasutaka OKADA, Daisuke MURAKAMI,  
Reizou MURAKAMI and Harushige TUBAKINO

**Synopsis :** Influence of silicon content of hot working tool steel (4mass%Cr-Mo-V-Ni) on machinability at milling process has been investigated. The effect of silicon was compared with that of lubricant, concerning tool life, cutting forces and temperature, chip detachment from a tool, tool damages, surface oxidization, microstructure and shapes of chip.

The observation of the chip detached from the tool by high-speed video camera showed that increasing the amount of silicon resulted in suppression of adhesion between the tool and the chips. This lubrication effect of silicon coincided with the effect of lubricant sprayed. The suppression of adhesion by increasing silicon content prolonged the tool lives, probably because the scale of Fe-Si-O formed on the surface of the chips of high silicon steel lubricated more effectively than that of Fe-Cr-O formed on the surface of low silicon steel.

**Key words:** tool steel; silicon; lubricant; machinability.

## 1. 緒言

汎用熱間工具鋼 JIS SKD6, 61, 62 は Si を約 1 mass% 含有している。熱間工具鋼における Si 添加の効果としては、高温耐酸化性の向上<sup>1)</sup>、変態点の上昇<sup>2)</sup>、焼戻し二次硬化<sup>3)</sup>、などが知られている。近年、熱間工具鋼のき裂対策として Si 量と靱性の関係が研究され、Si 量を低減した高靱性工具鋼が開発されている<sup>4-6)</sup>。筆者らも Si 量と高温強度の関係を研究し、低 Si 化に伴い焼入加熱時の未固溶炭化物量が低減し、焼戻しによる MC 析出量が増加するため高温強度が上昇することを明らかにした<sup>7)</sup>。

他方、Si 量の低減による被削性の低下が課題となっている<sup>8-10)</sup>。筆者ら<sup>11-13)</sup>は熱間工具鋼の被削性に及ぼす Si 添加の影響をフライス加工について調査し、Si 添加の効果として切りくずに生成したスケール層が凝着を抑制する潤滑効果を有するとの見解を提案してきた。これに対して Fujii ら<sup>9,10)</sup>は、熱間工具鋼の被削性に及ぼす Si 添加の影響をエンドミル加工と旋削加工について調査し、低 Si 化により高温強度が増大し、その結果、せん断応力が増大するために被削材の工具への凝着が激しくなり、被削性が低下すると報告している。

そこで本報では熱間工具鋼の被削性に及ぼす Si 添加の

影響をフライス加工について調査するとともに<sup>11)</sup>、潤滑油塗布の効果も合わせて調査し<sup>14)</sup>、工具損傷に及ぼす Si の効果と潤滑油の効果と比較することにより、Si の被削性改善機構を考察した。

## 2. 実験方法

熱間工具鋼 4mass%Cr-Mo-V-Ni 鋼の Si 量を、0.02 mass% から 1.6 mass% (以下、mass% を % と省略する) まで変化させた 75 kg 小鑄塊を 7 鋼種鑄込み、断面サイズが 110×110 mm の鍛伸材を作成した。大物金型を想定して、鍛伸材を焼入温度 1273K に加熱し大気中で空冷した。その結果、マルテンサイトとベイナイトの混在した組織であった。その後、焼戻し処理を 2 回行い、硬さを 43 HRC に調整した。また硬さの影響を調査するため一部 39HRC の試験片も作成した。43 HRC 試験片の焼戻し温度は 883K から 888K の範囲で、HRC39 の試験片は 908K から 913K の範囲であった。供試鋼の化学成分を Table 1 に示す。低 Si 鋼と高 Si 鋼について 43 HRC の鍛伸材中心部から、鍛造方向と直角方向に、直径が 6 mm で標点間距離が 30 mm の試験片を作成し、引張試験を行った。試験温度は室温から 1273K の範囲である。

平成 14 年 10 月 18 日受付 平成 14 年 12 月 13 日受理 (Received on Oct. 18, 2002; Accepted on Dec. 13, 2002)

\* 住友金属工業 (株) 交通産機品カンパニー (Railway Automotive & Machinery Parts Division, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 5-1-109 Shimaya Konohana-ku Osaka 554-0024)

\* 2 住友金属工業 (株) (Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

\* 3 住友電気ハードメタル (株) (Sumitomo Electric Hardmetal Corp.)

\* 4 姫路工業大学 (Himeji Institute of Technology)

Table 1. Chemical compositions of hot working tool steels used (mass%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
1	0.32	0.02	0.64	0.010	0.003	1.06	4.05	1.55	0.56
2	0.33	0.10	0.64	0.010	0.002	1.06	4.08	1.55	0.57
3	0.32	0.19	0.64	0.010	0.002	1.05	4.10	1.55	0.57
4	0.33	0.29	0.63	0.010	0.002	1.05	4.09	1.53	0.56
5	0.32	0.48	0.63	0.010	0.002	1.05	4.10	1.53	0.56
6	0.35	1.10	0.66	0.012	0.003	1.04	4.08	1.54	0.59
7	0.35	1.60	0.66	0.012	0.002	1.04	4.09	1.55	0.59

Table 2. Milling conditions.

Cutter	Diameter of cutter: $\phi 160$
	Axial rake angle: 5
	Radial rake angle: 0
	Number of cutter: 1
Insert grades	RDEN2004
	PVD coated cemented carbide
	cemented carbide: K20
	PVD: TiCN layer
Cutting speed	50m/min
Feeding speed	0.18mm/tooth
Cutting depth	3.0mm
Cutting method	Down cut
Cutting fluid	Dry, Spray lubricant on work

被削性試験は、断面100×100mm、長さ300mmの試験片を加工、切断し、100×300mmの面をフライス加工し工具寿命を評価した。寿命は工具逃げ面の摩耗が300 $\mu$ mに達するか、チッピング、フレーキングなどにより仕上げ面粗さが著しく低下した切削距離(mm)で表示した。フライス加工条件をTable 2に示す。

次に切削現象を明らかにするため以下の方法を用いた。

(1) 潤滑油の効果：フライス加工は乾式で実験したが、潤滑効果を明らかにする目的で一部の試験片について、極圧添加剤を含有した潤滑油を被削材に塗布した条件でも実験した。

(2) 切りくず排出性の直接観察：切りくずと工具との凝着性を直接観察する目的で、刃先が被削材から抜ける瞬間の切りくずの排出状況を高速度カメラで観察した。Fig. 1に高速度カメラによる切りくず排出観察実験の模式図を示す。

(3) 切削抵抗：切削動力計を用いて切削抵抗を測定した。フライス加工における切削抵抗は、回転工具のため切削抵抗の方向が時間とともに変化するが、各分力の最大値を求めた。

(4) 切りくずおよび工具の観察：切削初期、工具寿命の半分の切削距離、および、工具寿命に至った段階で工具損傷状態を観察するとともに発生した切りくずを採取した。工具刃先の損傷状態は光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し、物理的気相蒸着(PVD)層の剥離の有無を電子プローブ微小分析(EPMA)で分析した。さらに工具すくい面への被削材の移着状況を二次イオン質量分析法(SIMS)で分析した。切りくずは喰い付き部について、らせん傾き角、ピッチを測定した。また、樹脂に埋め込み、喰いつき部長手方向の幅中央が観察面となるように研磨した後、光学顕微鏡で切りくず長手断面の厚みを測定すると

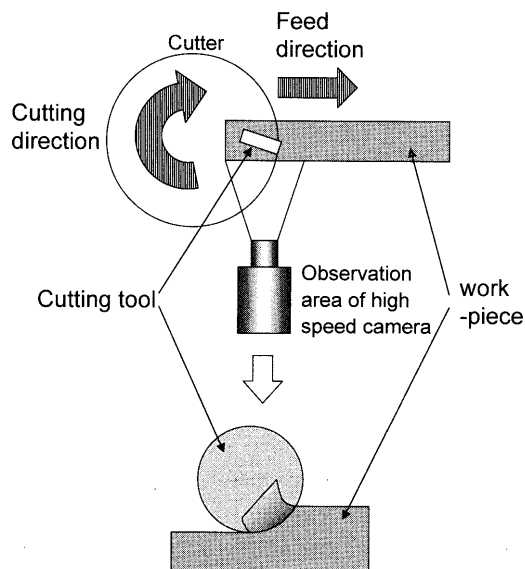


Fig. 1. Schematic diagram of milling and observation area of high-speed camera.

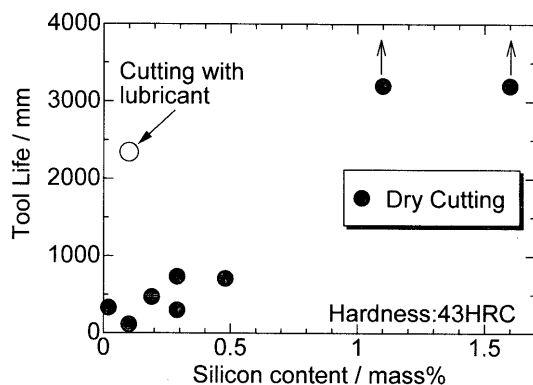


Fig. 2. Influence of silicon content and lubricant on tool life.

ともに塑性流動幅を測定し、断面形状を観察した。加えて、切りくず表面(工具接触面側)をSIMSで分析し、原子間力顕微鏡(AFM)で観察した。また、抽出レプリカにより切りくず断面の表面近傍における炭化物を同定するとともに、集束イオンビーム加工法(FIB)により作成した薄膜の組織を透過型電子顕微鏡(TEM)で観察した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 工具寿命に及ぼすSi量の影響

熱間工具鋼のフライス加工における工具寿命測定結果をFig. 2に示す。乾式切削の場合、Si量の低減に伴い工具寿命は著しく低下する。また、低Si鋼と高Si鋼の工具損傷状態をFig. 3に示すが、0.1% Si鋼は1.5% Si鋼の4%以下の切削距離で境界欠損が生じている。1.5% Si鋼は寿命に至らずに試験を中断しているが、逃げ面摩耗量は約150 $\mu$ mと極めて少ない。また、いずれの工具損傷も平滑な摩耗面を有する正常摩耗(アブレッシブ摩耗)とチッピングと切

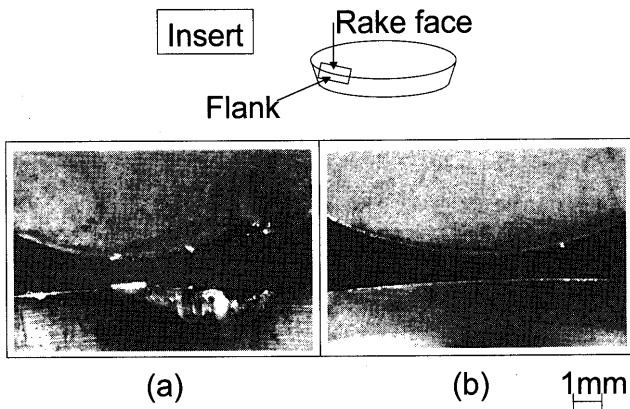


Fig. 3. Influence of silicon content on tool failures. (a) 0.1% silicon steel, cutting length 115 mm. (b) 1.6% silicon steel, cutting length 3200 mm.

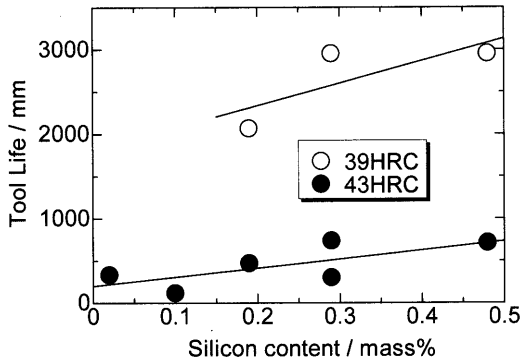


Fig. 4. Influence of silicon content and hardness of workpieces on tool life.

れ刃境界部に発生したフレーキングが混在しているが、低Si鋼ではチップングとフレーキングが、高Si鋼ではアブレッシブ摩耗が支配的である。

### 3.2 工具寿命に及ぼす硬さと潤滑油の影響

硬さを43 HRCから39 HRCに下げたときの工具寿命をFig. 4に示す。硬さを下げると低Si鋼でも工具寿命は向上してくるが、高Si鋼高硬度の工具寿命までは到達していない。低硬度により工具の損傷は軽微となっているが、やはりチップングが支配的であり、被削材の硬さを下げることにより、チップングの発生、進展を抑制していると考えられる。

0.1Si鋼(43 HRC)を用い、被削材に潤滑油を塗布した場合の工具寿命もFig. 2に合わせて示すが、潤滑油塗布により工具寿命は著しく向上した。ただし、この場合も高Si鋼の工具寿命までは至っていない。工具の損傷形態をFig. 5に示すが、潤滑油塗布により工具損傷は高Si鋼と同様なアブレッシブ摩耗が支配的となっている。一方、工具に潤滑油を塗布しても、改善効果は見られなかった。なお、潤滑油はパラフィンと油脂誘導体を石油系溶剤で希釈していると記載されていたが、EPMA分析の結果、ClとPが検出された。JIS K2241に切削油剤が規定されており、不水溶性切削油剤2種の不活性極圧油と考えられる。

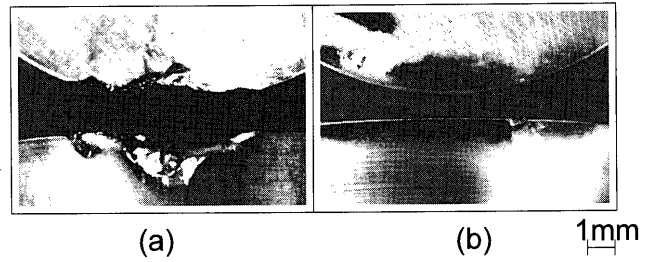


Fig. 5. Effect of wet cutting with lubricant of low 0.1% silicon steel (43 HRC) on tool failures. (a) Dry, cutting length 115 mm. (b) Lubricant, cutting length 2342 mm.

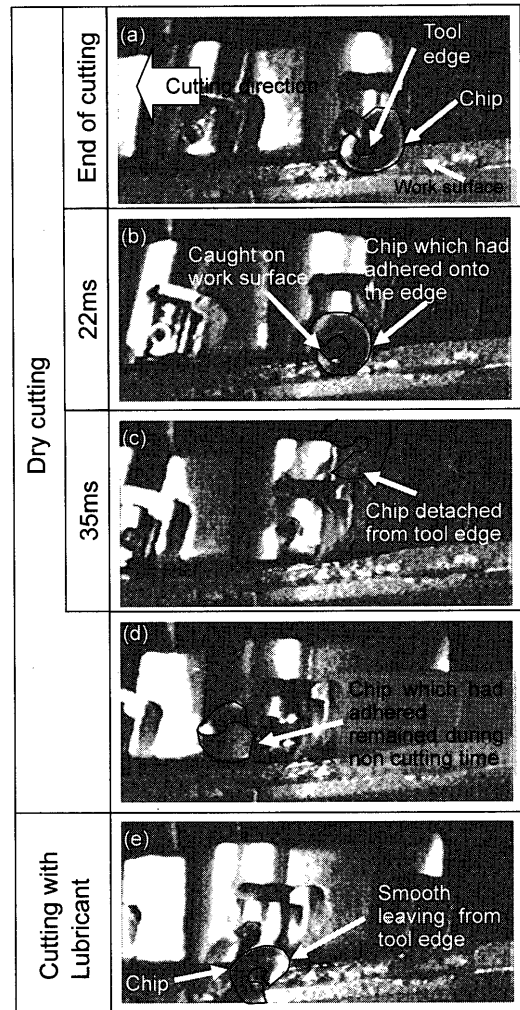


Fig. 6. Comparison of chip flow between dry cutting and lubricated cutting of 0.1% silicon steel.

### 3.3 高速度カメラによる切りくず凝着状況観察

低Si鋼について高速度カメラにより切りくずと工具の凝着状況を観察した結果をFig. 6に示す。乾式加工の場合、工具刃先に凝着した切りくずが、被削材端面に引っかかり、強制的に離脱した。また、切りくずが刃先に凝着したまま回転し、次の切削開始時に噛み込みを起こす場合も観察された。これに対して低Si鋼に潤滑油を塗布した場合、切削が終了した瞬間に、切りくずがスムーズに工具から離脱

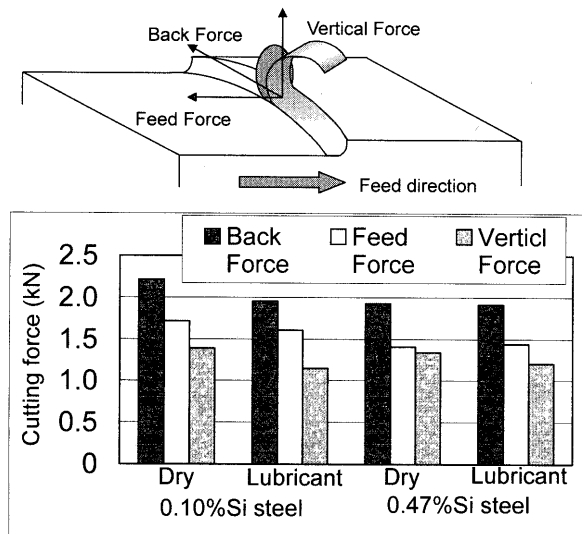


Fig. 7. Influence of silicon content and lubricant on cutting force.

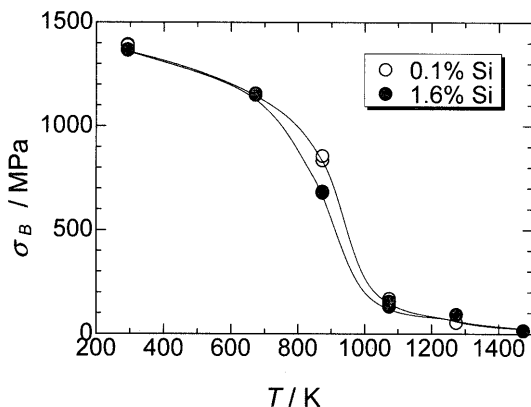


Fig. 8. Influence of silicon content on high-temperature tensile strength.

した。高Si鋼の場合も切りくずは刃先から自然に離脱した。

### 3.4 切削抵抗と高温引張試験

切削抵抗の測定結果をFig. 7に示す。乾式切削では低Si鋼の切削抵抗は高Si鋼と比較して高い。特に背分力と送り分力の増加が目立つ。低Si鋼の試験片表面に潤滑油を塗布すると切削抵抗が低下した。この場合は、垂直分力の減少が大きい。高Si鋼に潤滑材を塗布した場合には、垂直分力が少し減少したが、送り分力と背分力に変化は見られなかった。

室温から1273Kまでの引張強さの変化をFig. 8に示す。低Si鋼の引張強さは873Kでは高Si鋼より24%高いが、さらに高温のオーステナイト域になるとSiの強度に及ぼす影響は見られなかった。

### 3.5 工具刃先表面の観察

低Si鋼について切削初期での工具の損傷状態を調査した結果、乾式加工した工具切れ刃は凝着物がネガランド上部(すくい面側)に多く付着しており、これを除去し、

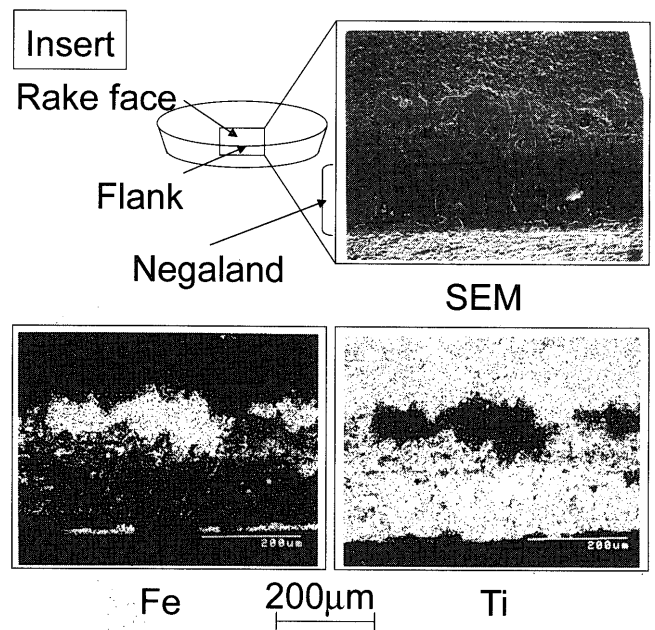


Fig. 9. EPMA analysis on nose of tool cutting 0.1% silicon steel piece.

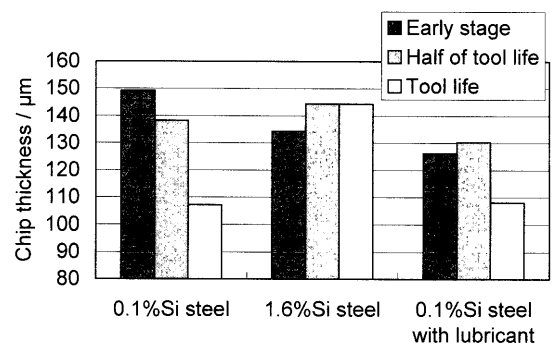


Fig. 10. Influence of silicon content and lubricant on chip thickness.

EPMA分析した結果をFig. 9に示す。ネガランドとすくい面の交差部でPVD層が一部、剥離しているのが観察された。低Si鋼に潤滑油を塗布した条件と高Si鋼の乾式切削でもSEM観察で凝着物は観察されたが、除去してもPVD層は損傷していなかった。

工具すくい面をSIMS分析の結果、低Si鋼、高Si鋼ともFeが工具表面に約2μm以上の領域に至るまで移着していたが、両者でその差は見られなかった。

### 3.6 切りくずの形状、組織解析

切りくず厚みの測定結果をFig.10に示す。切削初期と比較すると低Si鋼の切りくず厚みは高Si鋼、低Si鋼+潤滑油塗布より厚い。切削の進行とともに低Si鋼の切りくずは薄くなってきているが、高Si鋼および低Si鋼+潤滑油塗布の切りくず厚みには変化は見られなかった(低Si鋼+潤滑油塗布は寿命前には薄くなってきた)。切りくずの厚みの変化は工具のチッピング発生に対応して変化してきたと考えられる。なお、切りくず厚み測定位置に対応する、

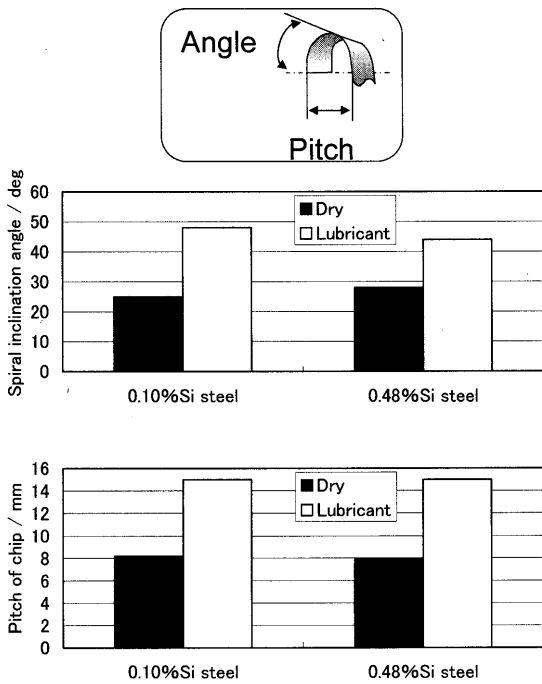


Fig. 11. Influence of silicon content and lubricant on spiral inclination angle and pitch of chips.

喰いつき部の切込み深さ中央（1.5 mm位置）での切削厚みを計算すると0.12 mmとなり、切削比は0.8から0.9であった。

切りくず断面を顕微鏡観察した結果、被削性の良好な高Si鋼と低Si鋼+潤滑油塗布の切りくず断面は切削初期から寿命まで平滑な流れ形を保っているのに対して、低Si鋼では切削初期から自由表面側の凹凸が大きかった。また、塑性流動層の厚みはいずれの試験片とも6~9 μmであり、Si量、潤滑油の影響は認められなかった。

切削初期切りくずのらせん傾き角、ピッチ測定結果をFig.11に示す。らせん傾き角、ピッチともSi量による差は見られなかったが、潤滑油を塗布するといずれの被削材もらせん傾き角、ピッチは大きくなった。なお、切りくずのカール半径も定性的であるが、Si量の影響は認められず、潤滑油により大きくなった。乾式切削では切りくずは上向きのカールに近く、つまっていたようになっているのに対して、潤滑油塗布ではサイドカールの要素が強くなり、らせん傾き角およびピッチは大きくなった。

### 3.7 切りくずの組織解析

切りくずの切削工具接触面をSIMSにて深さ方向に分析した結果をFig.12に示す。低Si鋼の切りくず表面には外層がFe-O、その内層にFe-Cr-Oが生成し、スケール層厚さは約0.11 μmであった。これに対して、高Si鋼には外層がFe-O、内層にFe-Si-Oが生成し、Crの濃化は認められなかった。スケール層厚さは薄く0.04 μmであった。潤滑油を塗布した低Si鋼のスケール層は乾式と同様に、外層がFe-O、その内層にFe-Cr-Oが生成し、厚さは0.2 μmと増大していた。

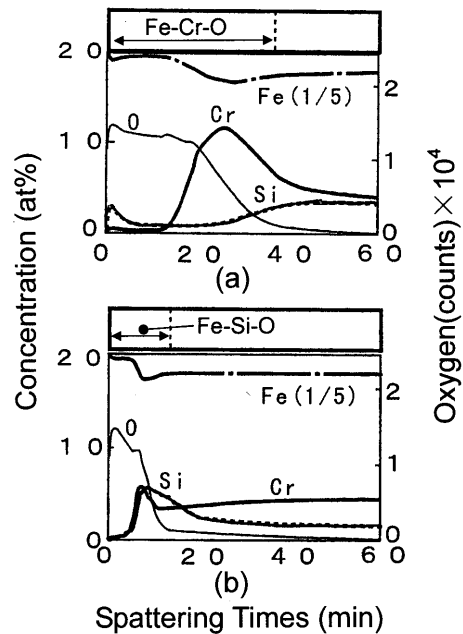


Fig. 12. SIMS analysis on surface of chips. (a) 0.1% silicon steel. (b) 1.6% silicon steel.

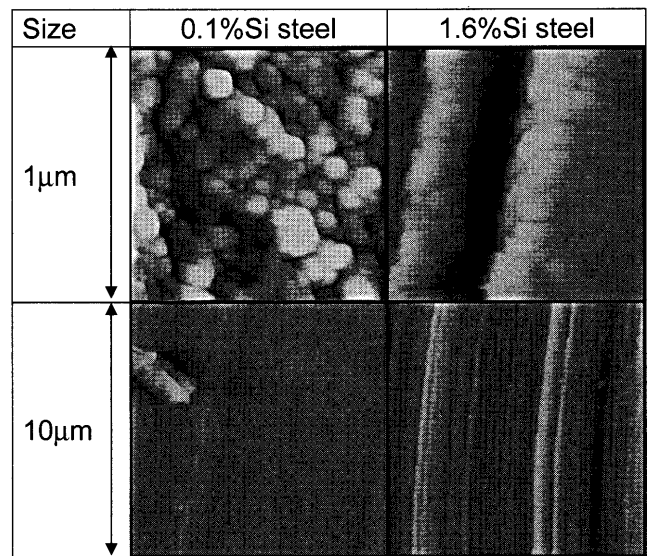


Fig. 13. AFM images on the surface of chips.

切りくずの工具接触面をAFM観察した結果をFig.13に示す。低Si鋼では粒状のスケールが観察されるのに対して高Si鋼のスケールは平滑化し擦過痕と見られる凹凸が観察される。

低Si鋼切りくず断面の抽出レプリカTEM観察結果をFig.14に示す。工具との接触面近傍約5 μm内部には粗大な炭化物と微細な球状炭化物が観察され、SAD解析した結果、球状炭化物はM(CN)であり、粗大な炭化物はM<sub>3</sub>Cであった。極表面層部ではM(CN)も固溶しており、約1300Kを越えていると判断される。切りくずの温度上昇に要する時間は短いため、さらに高温にまで達していると思われる。高Si鋼についても低Si鋼と同様な炭化物分布を呈していた。

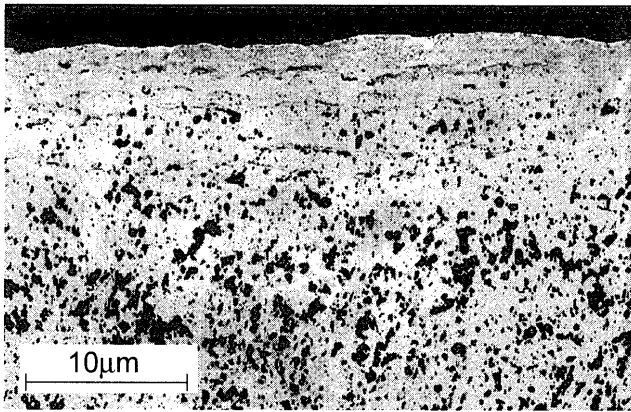


Fig. 14. Extraction replica images of 0.1% silicon steel chip section.

さらに、FIB薄膜のTEM観察とSAD回折を行った。低Si鋼のTEMおよびSAD回折像をFig.15に示す。Fig.15(a)は表面から2μm内部のTEM像で、SAD回折像はリング状の多結晶パターンを呈したのに対し、(b)の表面から5μm内部のSAD回折像は単結晶パターンを呈した。したがって、表層から約3μmまでは加工歪が昇温により回復し、再結晶をほぼ終えている段階で、その結晶粒度は0.1μm程度の微細粒となっている。これに対して、切りくず内部は同一オーステナイトから変態したマルテンサイトの隣会ラスと考えられ、再結晶が進んでいないと判断される。切りくず表層部の再結晶挙動は、高Si鋼、低Si鋼+潤滑油塗布とも同様であり、それぞれの切りくずの温度は大差ないと考えられる。

#### 4. 考察

##### 4.1 Siの効果と潤滑油塗布の効果の比較

今回の実験で得られたSiの効果と潤滑油塗布の効果と比較してTable 3に示す。

両者の効果が一致しているのは、切りくずの工具への凝着を低減し、離脱性が向上する結果、切りくずの脱落に伴う工具刃先のチップングを抑制する点である。また、切りくず厚みの低減とそれに伴う自由表面側の凹凸増大の抑制でも一致している。

一方、両者の効果が一致していない点は次の2点である。

(1) 切りくず形状(カール半径、らせん傾き角、ピッチ)は潤滑油塗布で変化したが、Si量では変化しなかった。

(2) 切削抵抗はSi量の増加と潤滑油の塗布で低減しているが、潤滑油塗布は垂直分力の減少に、Siは背分力と送り分力の低下に寄与しており、一致していない。

##### 4.2 工具寿命に及ぼす潤滑油塗布の効果

潤滑油を塗布すると工具寿命が改善する理由として以下の3点が挙げられる。

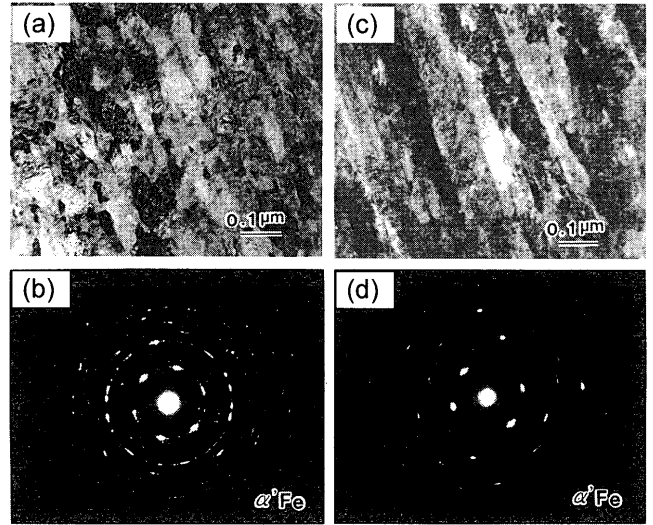


Fig. 15. TEM images and SAD patterns of 0.1% silicon steel chips sectioned by FIB method. Distance from surface of chip (a), (b) 2 μm; (c), (d) 5 μm

Table 3. Comparison of the effect of silicon content with the effect of lubricant on machinability.

	Influence of silicon content	Influence of lubricant
Decreasing in cutting temperature	ineffective	ineffective
Decreasing in cutting force	partly effective	effective
Decreasing in adhesion of tool/ chip	effective	effective
Formation of flow type chip	effective	effective
Decreasing in thickness chip	effective	effective
Increasing in curl radius of chip	ineffective	effective
Increasing in spiral inclination angle of chip	ineffective	effective
Increasing in pitch of chip	ineffective	effective

- 1) 潤滑効果による切りくず凝着の減少<sup>15)</sup>、ただし、不活性極圧油を被削材に塗布するだけであり、冷却効果はない。
- 2) 極圧油の化学的作用による刃先の保護膜生成。
- 3) 極圧油により被削材が劣化<sup>16)</sup>、せん断角が大きくなり、切屑厚みが減少。

工具に潤滑油を塗布しても、改善効果は見られなかった点より2)の保護膜生成の効果は認められない。また、潤滑油を被削材に塗布した後、1473Kまで加熱し、被削材と潤滑油の反応の有無を光学顕微鏡で調査したが、反応層は認められず、3)の被削材の劣化の影響もないと考えられる。以下、潤滑油塗布の実験結果が1)の潤滑作用により矛盾なく説明できるか検討した。

##### (1) 切りくず流出形態の変化、切りくず厚みの減少

潤滑効果により、切込み境界側で切りくずの排出がスムーズとなり、切りくずの流速が速くなり、切りくずは上

向きカールから横向きカールへと変化した。喰いつき時の潤滑性が切りくずの流出形態を決定していると判断される。切りくず厚みの変化も排出性の向上により説明できる。

## (2) 切削抵抗, 特に垂直分力の低減

切込み境界側の潤滑効果による切りくず流出方向の変化により垂直分力が低減していると考えられる。したがって、潤滑油を被削材に塗布すると工具寿命が改善するのは切りくず/工具すくい面の潤滑作用による切りくず流出形態変化に伴う排出性・離脱性が向上するためと考えられる。

### 4.3 工具寿命に及ぼすSi量の効果

快削元素の効果は以下のように分類されている<sup>17)</sup>。

- 1) 切りくずせん断域でのせん断エネルギーを減少させる。
- 2) 工具すくい面上での切りくず塑性流動域で塑性変形を容易にする。
- 3) 切りくず/工具界面の応力・温度条件下で、工具表面に潤滑剤ないし摩耗抑制剤として作用する。
- 4) 工具/切りくず界面で切削油剤や工具と相互に作用して、工具表面に潤滑油ないし摩耗抑制剤として作用する物質が新たに生成する。

この中で2)の塑性流動域での変形はSi量で変化しておらず、Siの効果として除外できる。

3)の潤滑剤ないし摩耗抑制剤としての作用も快削元素でないSiの効果としては考え難い。

Fujiiら<sup>10)</sup>は、旋削の切削抵抗測定結果から単一せん断面切削モデルを用いて解析し、Siの効果は1)のせん断域でのせん断応力の減少であり、高温強度の低下に起因しているとの結論を得ている。本実験結果でも、同一硬さであれば、873~973Kの試験温度範囲でSi量の高い方が高温強度は低下するが、たとえば、硬さ43 HRCの1.10% Si鋼と39HRCの0.19% Si鋼の873Kと973Kを比較すると、973Kではほぼ同一強度であったが、873Kでは高温強度は逆転し、工具寿命と高温強度は必ずしも対応していない。したがって、Siの効果は高温強度の低下とそれに伴うせん断応力の減少で説明することはできないと判断される。さらに、Fujiiら<sup>10)</sup>は切りくず/工具すくい面界面の温度が上昇した結果として凝着しやすくなったと報告しているが、切りくず観察による本実験結果ではSiの添加、潤滑油塗布のいずれでも切削温度の低下が観察されなかった。そこで旋削加工で工具に熱電対を埋め込み、切削温度を測定した。その結果をFig.16に示すが、旋削においても切削温度の低下は認められなかった。したがって、Siの効果はせん断面のエネルギー低下によりすべて解釈することはできないと考えられる。なお、切削温度がFujiiらの結果と一致しなかった理由として測定方法の差異(工具-被削材熱電対法と熱電対埋め込み法)、被削材の材質、硬さの差異などが考えられる。

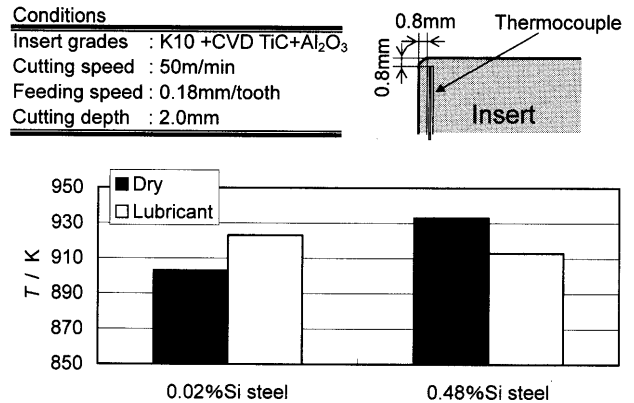


Fig. 16. Influence of silicon content and lubricant on cutting temperature turning.

4)の潤滑油ないし摩耗抑制剤として作用する物質が新たに生成するとの観点では、Trent<sup>18)</sup>によれば、S, Clの他、大気中の酸素も潤滑剤と考えられ、真空中と大気中では切りくず/工具間の接触長さ、凝着が異なることを解説している。したがって、工具界面の切りくず表面に生成したスケールが潤滑作用を有することは十分に考えられる。Fig.13に示したAFM観察結果より切りくず表面に生成したスケールは本来ならば、低Si鋼で観察された粒状の酸化物になるべきところ、高Si鋼ではこれが平滑化し擦過痕と見られる凹凸が観察された。また、Fig.12のSIMS分析結果より高Si鋼ではFe-Si-Oスケールが、低Si鋼ではFe-Cr-Oスケールが同定された。それぞれのスケールの共晶温度は1453K<sup>19)</sup>と1618K<sup>20)</sup>であり、Fe-Si-Oスケールの方が約150K低い。このスケールの融点と断面のレプリカ観察から想定できる表面近傍の温度(約1300Kを越えていると推定)から高Si鋼切りくず表面に存在するスケールは融点に近い温度まで昇温している可能性が高く、したがって軟化し潤滑作用を有したと推定できる。摩耗痕はスケールの軟化から派生したものと考えると表面状態を矛盾なく説明できる<sup>11-13)</sup>。

なお、高Si鋼で切りくず形状の変化と切削抵抗垂直分力の低減が認められなかった原因としては、潤滑油は切りくず生成前から被削材-工具間に存在しているため、切りくず/工具すくい面の広い接触面で潤滑効果を有しているのに対し、切りくず表面へのFe-Si-Oスケールの生成は界面の温度上昇と大気浸入の結果であり、その効果は接触面の一部において作用しているためと考えられる。以上のように、潤滑油塗布、Siの添加の主な作用は切りくず/工具間の潤滑作用であると考えられるが、切削温度が低下しなかった点についてはさらなる研究が必要である。

Siの効果としては、この他、一次炭化物(焼入時に固溶していない炭化物)の量も低Si鋼の方が少なくなっており、低Si鋼が凝着しやすいと推察される。ただし、V, Moを含有しない(一次炭化物を含有しない)フェライト-パーライト鋼においてもSi量の効果が観察されており<sup>13)</sup>,



この寄与は小さいと考えられる。なお、一次炭化物が多量に析出したSUJ2、冷間工具鋼では炭化物の量が増加すると工具寿命は低下すると報告されている<sup>21,22)</sup>。

## 5. 結論

(1) 熱間工具鋼中Siの効果と潤滑油塗布の効果をフライス加工により比較した結果、切りくずの工具への凝着を低減し、離脱性が向上する結果、切りくずの脱落に伴う工具刃先のチップングを抑制し、工具寿命が向上する点で一致した。

(2) 低Si鋼に潤滑油を塗布すると、切りくず流出形態の変化、切りくず厚みの減少と切削抵抗（特に垂直分力）の低減が見られ、潤滑油塗布の効果は切りくず/工具界面の潤滑性向上効果とみなすことができる。

(3) 切りくず表面（すくい面側）にはスケールが観察され、このスケールも潤滑作用を有すると考えられるが、低Si鋼と高Si鋼では組成が異なり、高Si鋼に生成したFe-Si-Oスケールが特に潤滑に貢献したと考えられる。ただし、切りくず流出形態と切削抵抗（垂直分力）はSi量に依存せず同等レベルであり、Siの効果は潤滑油塗布の効果とすべての点では一致しなかった。

(4) この他にSiの効果として、高温強度の低下によりせん断抵抗が減少する結果、切りくず/工具界面の温度が低下し、凝着が抑制されることも考えられるが、本実験範囲ではSi添加、潤滑油塗布とも切削温度の低下は認めら

れなかった。

## 文 献

- 1) 清永欣吾：工具鋼，日本鉄鋼協会，東京，(2000)，75.
- 2) T.Kunitake, T.Katou and T.Hasegawa: *Tetsu-to-Hagané*, **49** (1963), 1532.
- 3) W.M.Garrison, Jr.: *Mater. Sci. Technol.*, **3** (1987), 256.
- 4) T.Okuno: *Tokusyukou*, **46** (1997) July, 6.
- 5) H.Ogawa: *Tokusyukou*, **46** (1997) July, 23.
- 6) Y.Mukaida, T.Takahashi and H.Shibata: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 1176.
- 7) T.Sera, T.Yamaguchi, M.Umino, Y.Okada and K.Kondoh: *CAMP-ISIJ*, **9** (1998), 511.
- 8) K.Iwamoto: *Denki Seiko*, **64** (1993), 191.
- 9) T.Fujii and Y.Matsuda: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 1177.
- 10) T.Fujii and Y.Matsuda: *Denki Seiko*, **71** (2000), 119.
- 11) T.Sera, M.Umino, Y.Okada and R.Murakami: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 1404.
- 12) Y.Okada: *Netsu Shori*, **39** (1999), 225.
- 13) Y.Okada: *Netsu Shori*, **41** (2001), 183.
- 14) D.Murakami, R.Murakami, A.Ikegaya, H.Arimoto and T.Sera: Proc. of JSME 74th meeting (IV), The Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo, (1996), 317.
- 15) M.Noda: *Kikai Gijutsu*, **39** (1991), 1.
- 16) T.Kaneeda and T.Nakamura: Proc. of JSPE Autumn Meeting 1993, The Japan Society for Precision Engineering, Tokyo, (1993), 705.
- 17) T. Murakami and T. Shiraga: *NKK Tech. Rep.*, **178** (2002), 21.
- 18) E.M.Trent: *J. Iron Steel Inst.*, **201** (1963), 1001.
- 19) E.M.Levin and H.F.McMurdie: Phase Diagrams for Ceramists, Part II, The American Ceramics Society, Ohio, (1959), 14.
- 20) E.M.Levin and H.F.McMurdie: Phase Diagrams for Ceramists 1975 Supplement, The American Ceramics Society, Ohio, (1975), 25.
- 21) T.Inoue, Y.Hosoi, K.Nakajima, H.Takenaka and T.Hanyuda: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 387.
- 22) H.Nakagawa, T.Hirogaki, K.Nishimura, Y.Kakino, Y.Kita and H.Ohtsuka: *Seimitsu Kougakukaishi*, **67** (2001), 834.