

# 鋼の切削トライボロジー — 移着層形成と工具損傷機構に及ぼす 合金元素の影響 —

間 曾 利 治\*

## 1. 緒 言

特殊鋼棒鋼・線材は主に自動車用のエンジン部品、駆動系部品及び足回り部品などに広く使用されている。これらの部品の多くは、鋼材を鍛造や切削により所定の形状に加工した後、熱処理により必要強度を付与する工程を経て製造される。その中で切削のコストは全体の部品製造コストに占める割合が一般に大きく、製造コストを低減するには鋼材の被削性を向上させることが有効な手段の一つである。被削性には様々な評価指標が用いられるが、本稿では代表的な指標である切削工具寿命を被削性として考慮する。鋼材の被削性を向上させるためには、一般にSやPb等の快削元素が添加されるが、これらの元素は機械特性や環境の面において悪影響を与える場合が多く、新たな被削性改善手法が求められている。

切削は図1のように工具により被削材(本稿では鋼材)の一部を切りくずとして除去することで、被削材を所定の形状に仕上げる加工である。鋼の切削は工具刃先近傍において鋼材の高速大変形を伴い、特に鋼材と工具すくい面の接触界面は高温高圧となる。鋼材の種類や切削条件などに応じて、この領域の最大垂直応力は500~1600 MPa程度、最高温度は1000℃以上にもなるといわれている<sup>(1)(2)</sup>。このため鋼材が工具すくい面の表面へ凝着し、さらには新たな反応物が生成する場合がある。本稿ではこの現象を材料移着と呼ぶ。材料移着により、工具表面には薄い移着層が形成される。移着層は接触界面での摩擦特性や工具摩耗などのトライボロジー特性に種々の影響を及ぼす。

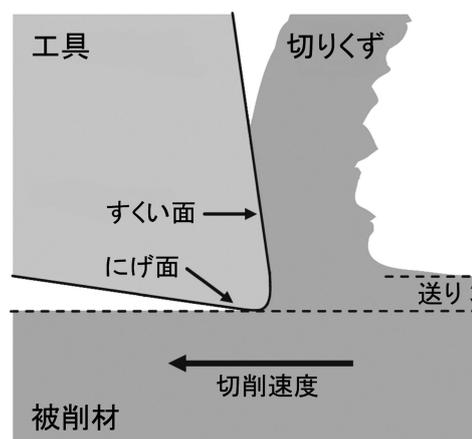


図1 切削断面の模式図。

移着層の性質は鋼材、工具及び切削条件などによって大きく影響される。切削は旋削やドリル加工のような連続切削、及び歯切り加工やフライス加工に代表される断続切削に大別される。このうち断続切削では極短時間中に工具が被削材との接触と非接触を繰り返すために、工具すくい面と被削材の接触界面には大気中の酸素が侵入する。このため、工具表面に移着した被削材は瞬時に酸化されて酸化物となる。実際、合金鋼を歯切りした後の歯切り工具のすくい面上には、FeとCr、Mn、Siなどの合金成分を高濃度に含む酸化物が生成することが報告されている<sup>(3)</sup>。これらの金属元素はいずれも被削材に含まれる元素であり、移着層の形成には被削材の化学成分が大きく影響することが示唆される。そこで著者らは

\* 新日鐵住金株式会社 技術開発本部 鉄鋼研究所 棒線研究所；主任研究員(〒293-8511 富津市新富20-1)  
Tribology in Machining of Steels: The Effects of Alloying Elements on Material Transfer and Coating Damage Mechanisms; Toshiharu Aiso (Bar & Wire Rod Research Lab., Steel Research Laboratories, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, Futtsu)  
Keywords: metal cutting, steel, cutting tools, transfer, coating, sliding  
2017年2月28日受理[doi:10.2320/materia.56.397]

断続切削を主な対象とし、鋼材中の合金元素が移着層形成に及ぼす影響、及び形成された移着層が界面での摩擦特性や工具摩耗に及ぼす影響を調査した。本稿ではそれらの代表的な実験結果を紹介し、切削界面でのトライボロジー特性、ひいては被削性における移着層の重要性について述べる。

## 2. 摩擦摩耗試験による移着層と摩擦係数の評価

Gerth ら<sup>(4)</sup>は直交二円筒型摩擦摩耗試験により、断続切削中に生成する移着層を模擬できることを示した。この摩擦摩耗試験は汎用の旋盤を用い、図2のように<sup>(5)</sup>、ホルダーにセットされた小さな工具シリンダを大きな鋼材シリンダに一定荷重で押し当て、鋼材シリンダを回転させることで所定のすべり速度で接触させるものである。旋盤の送り機構を用いて工具シリンダを移動させることで、同じ箇所での繰り返し接触を防ぎ、実切削での鋼材と工具すくい面の接触を模擬している。切りくず生成が無く、鋼材と工具の接触のみを評価できるため、この試験は移着層の影響のみを調査するために極めて有効であり、本研究ではこの試験方法を主に用いた。

鋼材シリンダは試験の直前に仕上げ加工して汚れの無い表面としているが、鋼材シリンダ表面には不可避に薄い酸化鉄が存在する。今回の試験では両シリンダが連続接触するため、接触界面への大気からの実質的な酸素侵入は無いが、この酸化鉄が界面での反応時の酸素供給源となるため、断続切削時の移着層の生成を模擬することができる<sup>(6)</sup>。

本摩擦摩耗試験での主な試験パラメータはすべり速度と荷重である。これらを変化させると摩擦発熱量が変化し、それに応じて材料移着挙動が変化することを明らかにしている<sup>(7)</sup>。本実験では典型的な切削条件で実切削を行った場合の材料移着が模擬できるように試験条件を設定した(100 m/min, 75N)。試験はいずれも大気中、室温で無潤滑で行った。

合金元素の影響を明確にするために、鋼材シリンダとして Fe-0.55 mass% C 鋼(ベース鋼)及びそれに 1 mass% Si, Mn, Cr 及び Al を単独及び複合添加させたモデル鋼を使用した。鋼材成分に応じて熱処理条件を変えることで、ほぼ同等の組織と硬さを有する鋼材を作製した。工具シリンダには汎用の

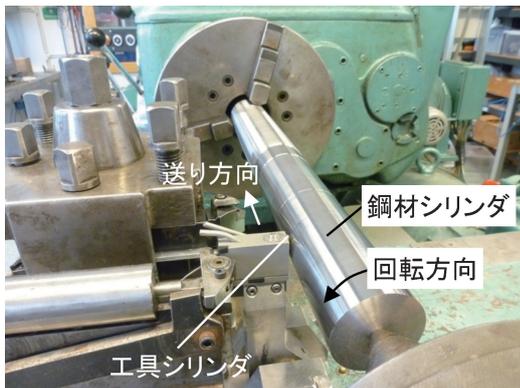


図2 直交二円筒型摩擦摩耗試験機<sup>(5)</sup>。

工具材である TiN コーティング高速鋼を用いた。

図3に Si 単独添加鋼使用時の結果を例示するように、本試験後の工具材表面には楕円に近い形状の移着層が形成された<sup>(8)</sup>。移着層の組成は Fe-Si-O であり、鋼材への Si 添加量が 1 mass% のみであるにもかかわらず、移着層中には Si が濃化していた。鋼材成分を変化させると、異なる移着層が生成し、移着層内には Fe, O とそれぞれの鋼材に含まれる合金元素が存在した<sup>(5)(8)</sup>。いずれの鋼材成分を用いた場合でも、そのほとんどにおいて合金元素の濃化が見られた。これは高温高圧となる接触界面において、鋼材シリンダ表面の薄い酸化鉄のみを酸素供給源とした低酸素下での界面反応が起こるためである。低酸素下では鉄は酸化されにくく、鉄よりも酸化されやすい Si のような合金元素が選択的に酸化され、移着層中に濃化したものと考えられる。

図4に示すように各合金元素の単独添加の場合、ベース鋼を基準にすると Si 添加と Mn 添加で低摩擦係数となり、Cr 添加と Al 添加では高摩擦係数となった<sup>(5)(8)</sup>。これらの摩擦係数の違いは、鋼材成分の違いによって異なる移着層が生成したためである。Cr 添加と Al 添加の場合にそれぞれ約 1.5 秒、0.8 秒後にカーブの振幅が大きく変化しているが、これは高摩擦係数のために工具コーティングにクラックが生じ、接触状態が大きく変化したためである。

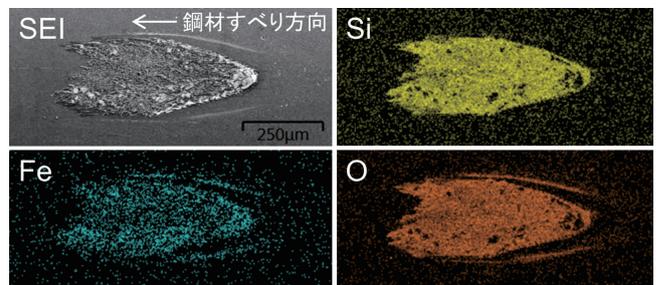


図3 Si 単独添加鋼を用いた試験後に工具シリンダ上に生成した移着層の表面 SEM 像及び EDS 元素マップ<sup>(8)</sup>。

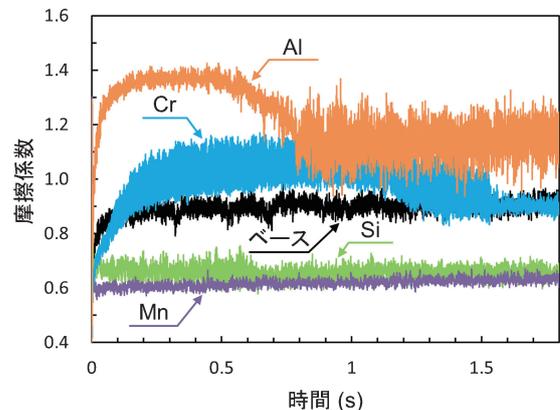


図4 ベース鋼及び各合金元素の単独添加鋼を用いた試験中の摩擦係数<sup>(5)(8)</sup>。

### 3. 摩擦係数と工具損傷機構に及ぼす移着層の影響

以下に Si, Al 及び Mn の単独添加の場合を例に挙げて、移着層形成と摩擦係数及び工具損傷機構との関連性を示す。

Si 単独添加の場合、保護性移着層が形成された。図 5(a) のように、接触を担う移着層の表面は非常に滑らかであり、この層によって低摩擦が得られた<sup>(8)</sup>。図 5(b) の断面観察において、移着層は凝着鉄の小片(白色部)を僅かに含むが、主に Fe-Si-O からなり、最大厚さが約 6 μm で、コーティング表面を覆っていた。コーティング厚さは試験前とほぼ変化しておらず、移着層がコーティングの摩耗を防いだことがわかる。

Al 単独添加の場合、移着層はコーティングの破壊を促進した。試験の極初期には、図 6(a) のように鉄の凝着物(灰色部)が広範囲に存在し、その間に Al 濃化層(黒色部)が見られた<sup>(5)</sup>。図 6(b) の断面観察から、まず厚さ数 10 nm の Al 濃化層がコーティング表面を覆い、図中左側の Al 濃化層が厚くなった部位に引っかかるようにして凝着鉄が存在したことがわかる。つまり生成した Al 濃化層によって生じた凹凸により、鉄の凝着が促進されたものと考えられる。断面の EDS 点分析により、この Al 濃化層は Al-O であることを確認した<sup>(5)</sup>。

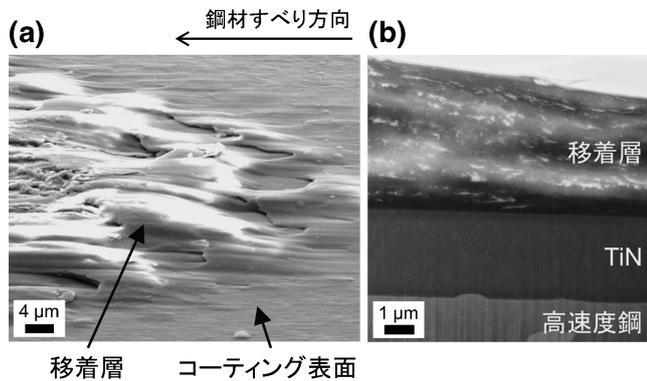


図 5 Si 単独添加鋼使用時の移着層。(a)表面 SEM 像 (65度サンプル傾斜), (b)断面 SEM 像<sup>(8)</sup>。

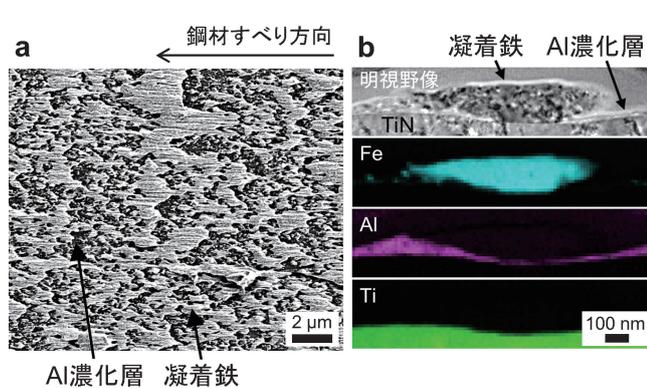


図 6 Al 単独添加鋼使用時のコーティングクラックが生じる前の移着層。(a)表面 SEM 像, (b)断面 TEM 像及び EDS 元素マップ<sup>(5)</sup>。

試験時間を長くすると、図 7 に示すように、接触部中央付近にコーティングのクラックが生じた<sup>(5)</sup>。コーティング直下の基盤材(高速度鋼)には白層が見られた。白層は、元々焼戻しマルテンサイトであった基盤材が、試験中の発熱により軟質なオーステナイトに変態し、試験後に冷やされて新生マルテンサイトになった領域であり、接触温度は 900°C 以上であったと推察される<sup>(4)</sup>。試験中に基盤材が軟化して変形したため、コーティングを支持することができなくなり、コーティングの破壊が起こったものと思われる。この高い摩擦発熱、つまり高い摩擦係数は Al-O の生成によってもたらされた。

摩擦係数は移着層を含む界面領域でのせん断力に大きく影響される。海野ら<sup>(9)</sup>は実際の断続切削において、接触界面は高温となるため、界面生成酸化物の融点が潤滑特性に影響すると考察している。本実験の場合、融点が低い Fe-Si-O (共晶温度: 1453 K) は接触時の軟化の度合いが大きいため、せん断力が低減されて低摩擦係数をもたらし、逆に高融点である Al-O (融点: 2323 K) は接触時の軟化が小さく、せん断強度が高いものと考えられる。実際、本実験で得られた摩擦係数を、移着層の融点もしくは共晶温度により整理すると良い相関を示すことを確認している<sup>(10)</sup>。

Mn 単独添加の場合、図 8 に示すように、Fe-Mn-O 移着物がコーティング上に点在するのみで、その生成面積は小さかった<sup>(5)</sup>。このような形態の移着物は保護膜として機能しな

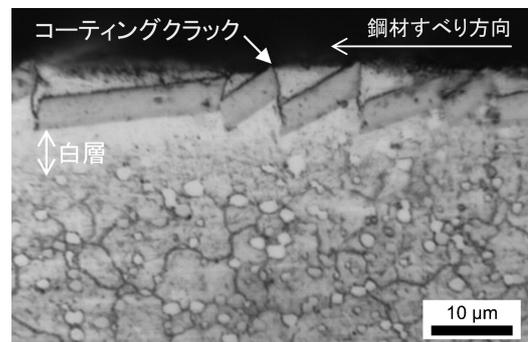


図 7 Al 単独添加鋼使用時のコーティングクラックが生じた後の工具材断面の光学顕微鏡像<sup>(5)</sup>。

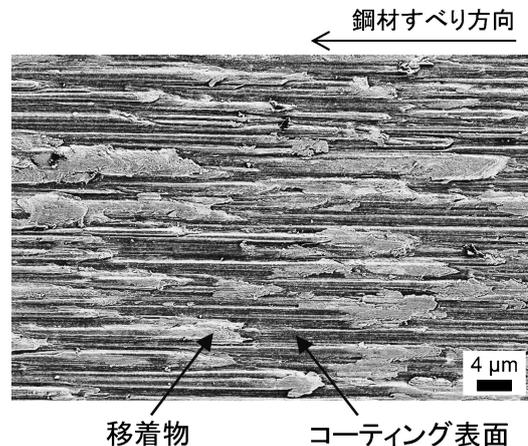


図 8 Mn 単独添加鋼使用時の移着物の表面 SEM 像<sup>(5)</sup>。

