

(論文)

## 非調質コンロッド用鋼の被削性に及ぼすCaの影響

大脇章弘\*<sup>1</sup>・山本雄也\*<sup>2</sup>・杉村朋子\*<sup>2</sup>

### Effect of Ca on the Machinability of Non-Heat-Treated Steel for Connecting Rods

Akihiro OWAKI・Yuya YAMAMOTO・Tomoko SUGIMURA

#### 要旨

当社では、熱間鍛造用非調質鋼で世界最高レベルの強度と被削性を両立したかち割りコンロッド用鋼を開発した。本開発鋼では、サーメット工具を用いた旋削加工において、高強度化に伴う被削性の悪化を抑制するためにCa量を制御している。これまでの研究では、Ca添加による工具摩耗の抑制は、すくい面に対して効果があるとされているが、開発鋼は逃げ面での効果が認められている。そこでSEMとTEMを用いて、旋削工具刃先の摩耗具合、付着物の有無やその組成を詳細に調査し、逃げ面における工具摩耗の抑制メカニズムについて考察を行った。その結果、①旋削加工中に付着物が逃げ面側に流動し、その過程においてトライボケミカル摩耗を抑制、②Ca系酸化物が工具中のバインダ相中成分の拡散を防止し、バインダ相の劣化を抑制することで、サーメット工具中の硬質粒子の欠落を抑制、の二つの要因を明らかにした。そして、これらの効果が重畳して、工具摩耗が抑制されている可能性を突き止めた。

#### Abstract

Kobe Steel has developed a steel for fracture-split connecting rods that achieves both the world-class high strength among non-heat-treated steels and excellent machinability. In this newly developed steel, calcium (Ca) content is precisely controlled to mitigate the degradation in machinability typically caused by increased material strength during turning with cermet tools. While previous studies suggest that Ca addition primarily suppresses tool wear in terms of rake face wear, this newly developed steel exhibits a significant protective effect on the flank face. Hence, the wear behavior at the tool's cutting edge, along with the composition of adhered deposits, has been considered using SEM and TEM to elucidate the mechanism of flank face wear suppression. The results have identified two primary contributing factors: (1) migration of adhered deposits toward the flank face during turning, which inhibits tribochemical wear; and (2) the formation of Ca-based oxides that act as a diffusion barrier for binder-phase constituents, preventing binder degradation and the subsequent pull-out of hard particles from the cermet tools. Furthermore, the results suggest that these mechanisms act in combination, leading to a significant overall reduction in tool wear.

#### 検索用キーワード

熱間鍛造用非調質鋼, コンロッド, Ca, belag, 工具摩耗, 被削性

まえがき = 近年、環境負荷低減のためにCO<sub>2</sub>排出量を削減し、将来的にはCN (Carbon Neutral) を達成することが強く求められている。自動車において、CO<sub>2</sub>削減には動力の電動化が有効な手段であるいっぽうで、今後もエンジン搭載車は残存する見通しである。このため、エンジンの高効率化もCO<sub>2</sub>削減に有効な手段の一つである。エンジンのピストン運動をクランクシャフトへ伝える部品であるコネクティングロッド(以下、コンロッドという。)の小型・軽量化は、コンロッド自体の質量低減に加え、周辺部品も軽量化できるため、エンジンの高効率化に大きく寄与する。またコンロッドは製造コストの低減要望から、従来はロッド部とキャップ部を別々に鍛造・切削加工していたが、近年ではこれらを一体で鍛造・切削加工し、破断分割(以下、かち割りという。)する製造方法(図1)を採用する自動車メーカーが増えている。これを受けて、鉄鋼メーカー各社では、コンロッドの小型・軽量化に必要な高強度化、これに伴い悪化する被削性との両立および、製造コストの低減につながるか

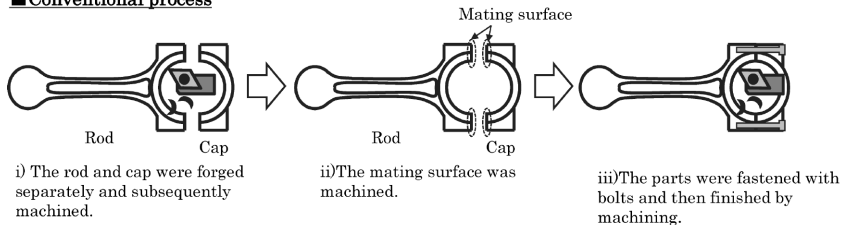
ち割り工程に適している新鋼種を開発を行っている(図2)。

そのような中、当社では熱間鍛造用非調質鋼でありながら被削性を兼備した世界最高レベルの高強度を有したかち割りコンロッド用鋼を開発した。本開発鋼では、サーメット工具を用いた旋削加工において、高強度化に伴う被削性の悪化を抑制するためにCa量を制御している。これまでの研究では、Ca, Al, Mgなどを含む酸化物が工具刃先に付着し保護膜(以下、belagという。)が形成され、工具成分が切くずへ拡散していくことを抑えることで工具摩耗が抑制されると考えられている<sup>1), 2)</sup>。また、酸化物系介在物による工具摩耗の抑制は、すくい面に対して効果があるとされている。しかし、開発鋼は逃げ面での効果が認められており、同様のメカニズムで工具摩耗が抑制されているかは不明である。

そこで逃げ面において工具摩耗が抑制される要因について、刃先の摩耗具合、付着物の有無やその組成に対して詳細調査と考察を行った。

\*<sup>1</sup> 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部 \*<sup>2</sup> 技術開発本部 材料研究所

■ Conventional process



■ Fracture-split process

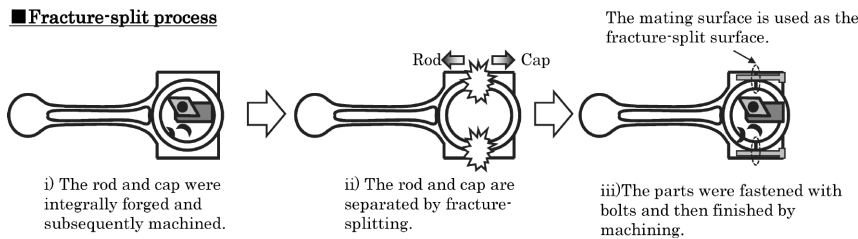


図1 コンロッドの製造工程

Fig.1 Manufacturing process of a connecting rod

Improving efficiencies of its engine

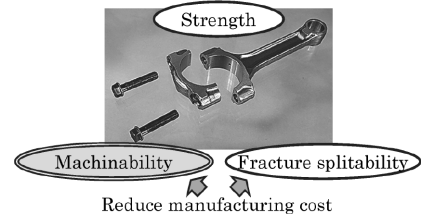


図2 コンロッド用鋼に求められる必要特性  
Fig.2 Necessary properties of the steels for connecting rod

1. 実験方法

Caの被削性への影響を見るためにCa量を調整した2鋼種(以下、それぞれNon-Ca, Add-Caという。)を準備し、その化学成分を表1に示す。鋼材は実機工程で製造した鋼片を用いて、直径36mmに熱間圧延したのち、直径25mmまで外周旋削加工した。加工した鋼材をコンロッド相当の強度とするため熱間鍛造模擬の熱処理(1,200℃×1hr, 制御冷却)を行い被削材を作製した。被削材の組織と硬さを図3に示す。

Non-Ca, Add-Caに対して、表2の条件で旋削加工試験を行い、Caの被削性への影響について検討した。被削性は表2の切削距離で切削を停止し、そのときの逃げ面の工具摩耗量を測定し、切削距離に対する工具摩耗の進行度合いで評価した。

2. 実験結果

2.1 旋削加工試験結果

旋削加工試験の結果を図4に示す。Add-Caを削った旋削工具(以下、Add-Ca旋削工具という。)はNon-Caを削った旋削工具(以下、Non-Ca旋削工具という。)に比べて逃げ面の工具摩耗が抑制されており、被削性の改善が認められた。工具摩耗が抑制された要因を把握するため、Non-Ca旋削工具、Add-Ca旋削工具のそれぞれの刃先の詳細な観察を行った。

2.2 旋削工具刃先の観察

図5に工具の刃先を逃げ面側からSEM観察およびEDXマッピングした方向を示し、図6にその結果を示す。Non-Ca旋削工具、Add-Ca旋削工具ともに刃先(写真の中央)で幅が最大となる摩耗をしており、境界摩耗は認められなかった。また、被削材が凝着している様子も認められなかった。Non-Ca旋削工具は摩耗面内の中央付近に色が異なる部分がまばらに、Add-Ca旋削工具は主に摩耗部と未摩耗部の境界付近に色が異なる部分が認められ、いずれも工具と異なる成分が付着していることを示している。Caの元素マッピングの結果、Add-Ca

表1 供試材の化学成分

Table 1 Chemical compositions of samples

| Sample | (mass%) |      |      |       |       |          |   |     |
|--------|---------|------|------|-------|-------|----------|---|-----|
|        | C       | Si   | Mn   | P     | S     | Cr       | V | Ca  |
| Non-Ca | 0.49    | 0.25 | 0.59 | 0.008 | 0.037 | addition |   | tr. |
| Add-Ca | 0.50    | 0.26 | 0.57 | 0.011 | 0.044 | addition |   |     |

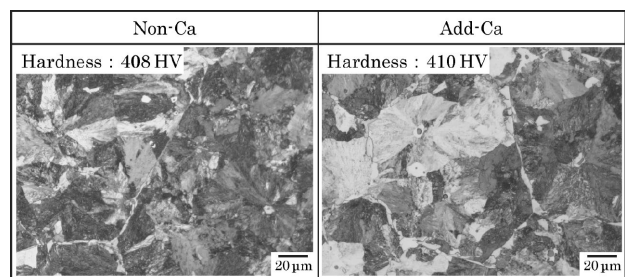


図3 被削材の組織と硬さ

Fig.3 Microstructures and hardness of Non-Ca and Add-Ca

表2 旋削加工条件

Table 2 Cutting conditions for turning

| Tool material         | Cermet (uncoated)            |
|-----------------------|------------------------------|
| Cutting speed (m/min) | 200                          |
| Feed rate (mm/rev)    | 0.1                          |
| Depth of cut (mm)     | 0.5                          |
| Coolant               | Wet                          |
| Cutting distance (m)  | 30, 200, 1,000, 3,000, 5,000 |

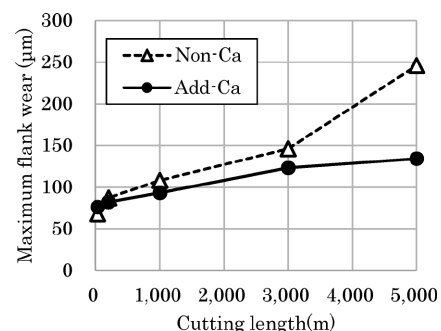


図4 旋削加工試験結果

Fig.4 Turning test result

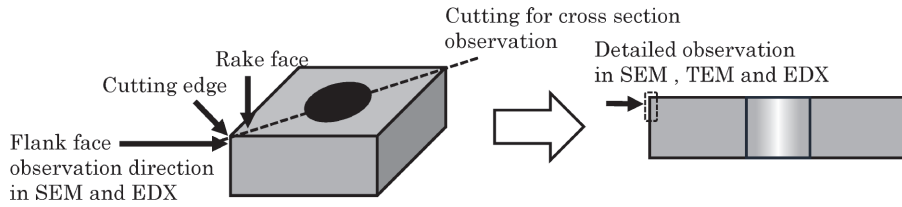


図5 旋削工具刃先の観察方法

Fig.5 Observation method for the cutting edge of the turning tool

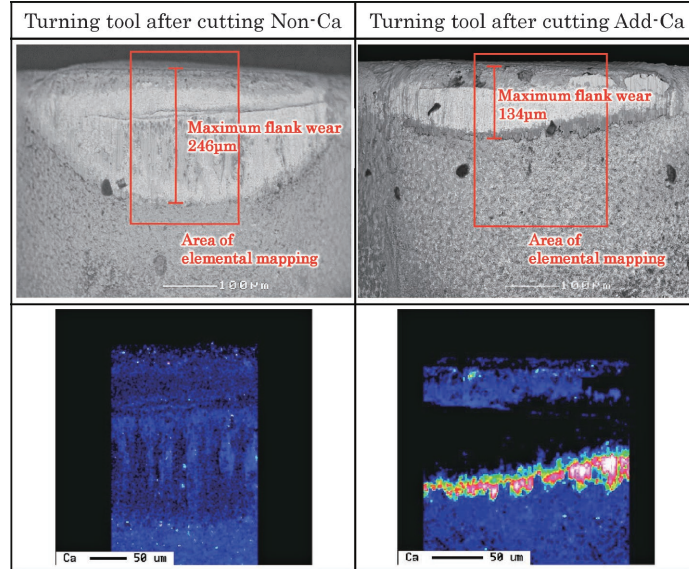


図6 旋削工具逃げ面のSEM観察およびCaの元素マッピング

Fig.6 SEM observation results and Ca elemental mappings of flank face of the turning tool

旋削工具は摩耗部と未摩耗部の境界付近にCaの濃化が認められた。

### 2.3 旋削工具刃先の詳細な観察

さらに旋削工具刃先を詳細に調査するため、SEMを用いて図5に示す旋削工具刃先断面の複数の観察視野をつなぎ合わせ、付着物を除く工具表面に黄色線を引いた結果を図7に示す。Add-Ca旋削工具は被削材との摩擦によりならされた結果と考えられる比較的なめらかな面をしている。いっぽうでNon-Ca旋削工具は、矢印で示す位置にサブミクロン～数 $\mu\text{m}$ の凹みが多数認められる。

さらに図7の付着物が認められる箇所の赤枠（観察位置①：切れ刃、観察位置②：摩耗中央）において、TEM観察およびEDXマッピングした結果を図8（Non-Ca旋削工具）と図9（Add-Ca旋削工具）に示す。あわせて、付着物を除く工具表面に黄色線を示す。観察位置①：切れ刃において、Non-Ca旋削工具はAlとSiとO、MnとS、VとOが同位置に認められ、それぞれAl-Si系酸化物、MnS、V系酸化物が付着していると考えられる。いっぽうAdd-Ca旋削工具は、AlとSiとCaとO、MnとS、VとOが同位置に認められ、それぞれAl-Ca-Si系酸化物、MnS、V系酸化物が付着したものと考えられ、Caを含む酸化物が付着しているという点においてNon-Ca旋削工具とAdd-Ca旋削工具に差異が認められる。観察位置②：摩耗中央においても、Non-Ca旋削工具はAlとSiとO、MnとSが同位置に認められ、それぞれAl-Si系酸化物、

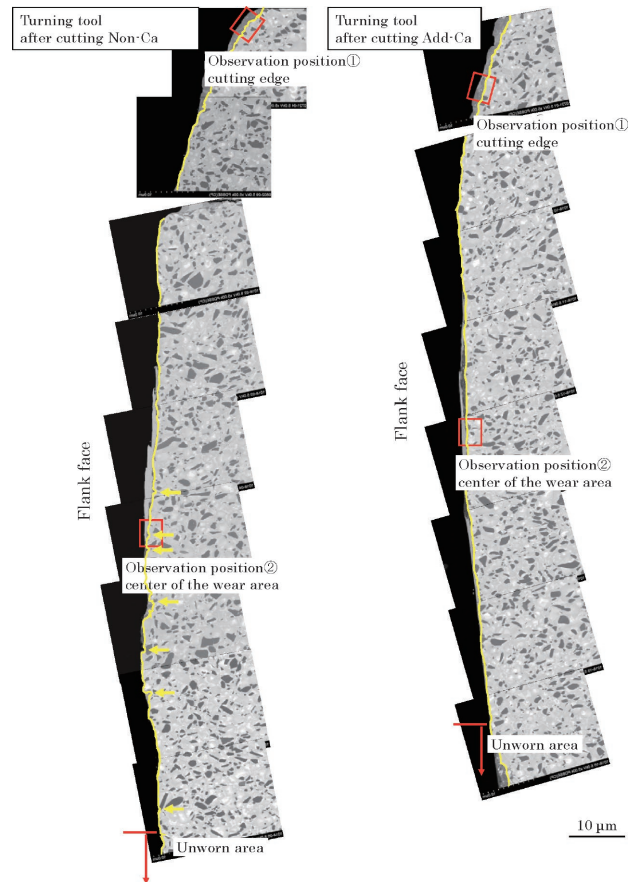


図7 旋削工具断面のSEM観察

Fig.7 SEM observation results of the cross section of the turning tool

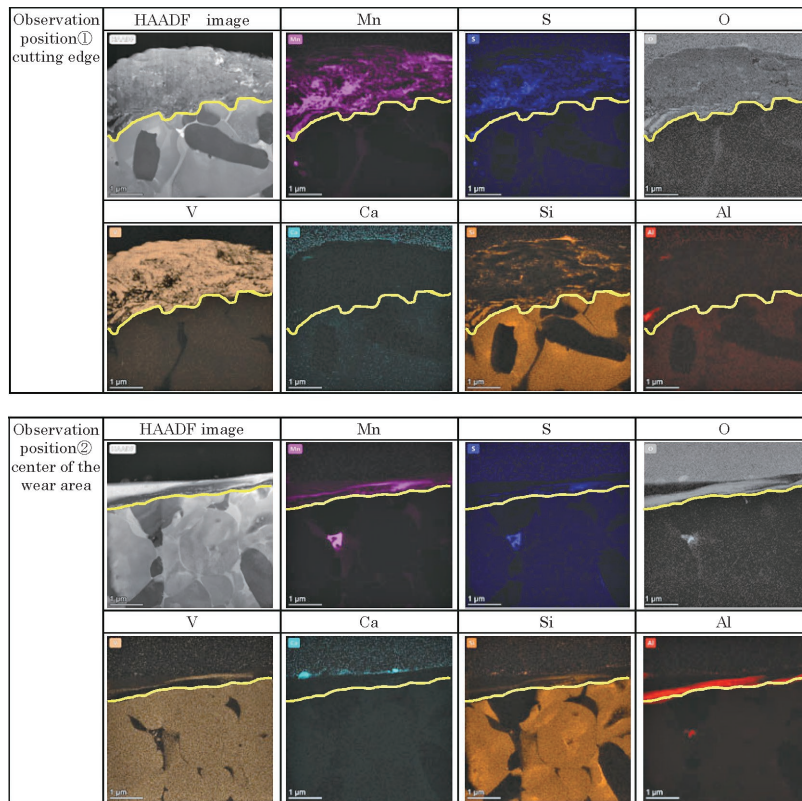


図8 Non-Caの旋削工具断面のTEM観察および元素マッピング

Fig.8 TEM observation results and elemental mappings of the cross section of the turning tool in Non-Ca

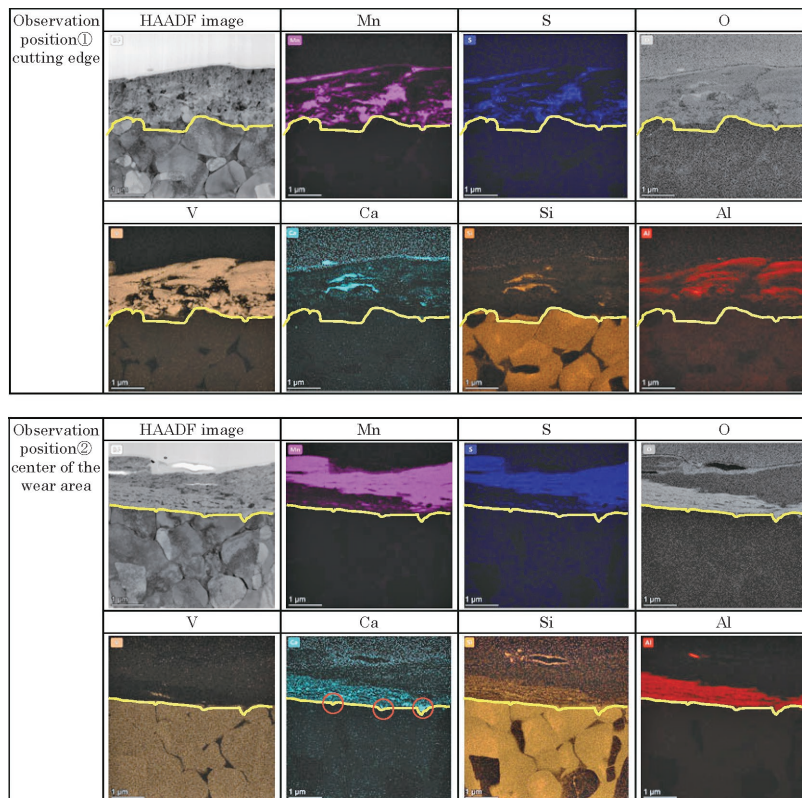


図9 Add-Caの旋削工具断面のTEM観察および元素マッピング

Fig.9 TEM observation results and elemental mappings of the tool cross section of the turning tool in Add-Ca

MnSが付着していると考えられる。ちなみにNon-Ca旋削工具にもCaが濃化している様子が認められるが、HAADF像から観察用に埋め込んだ樹脂の部分に相当するため、コンタミと判断した。いっぽうAdd-Ca旋削工

具についても同様に、AlとSiとCaとO、MnとSが同位置に認められ、それぞれAl-Ca-Si系酸化物とMnSが付着していると考えられる。

### 3. 考察

工具摩耗が起こるメカニズムはいくつか存在することが報告されており、旋削工具刃先の温度が低温では凝着摩耗やアプレシブ摩耗がメインとなり、高温では拡散などのトライボケミカル摩耗がメインになると言われている<sup>3)</sup>。

今回の旋削加工条件では図6より旋削工具刃先に凝着は認められなかったことから、摩耗はトライボケミカル摩耗がメインであったと考えられる。そこで、トライボケミカル摩耗へのCaの影響について考察を行った。

#### 3.1 belagによるトライボケミカル摩耗の抑制

まず、付着物の形成過程について考察する。最初に被削材と接触する切れ刃には鋼中に含まれる酸化物系や硫化物系の介在物の堆積、および鋼中成分のVが酸化することでV系酸化物の形成が起こる。次に、この一部が被削材との摩擦によって逃げ面側に流動する。ただし、逃げ面は被削材と高い圧力で接触しつつ摩擦を受けるため、付着と押し流される状態が繰り返され、図6に示すような付着物の状態が形成されると考えられる。また、押し流された付着物は、逃げ面と被削材が離れる場所、つまり摩耗部と未摩耗部の境界に堆積し、図6のAdd-Ca旋削工具に示すような摩耗部と未摩耗部の境界にCaの濃化部が形成されると考えられる。

これまでの研究で言われていたようなすくい面とは異なり、逃げ面では工具を覆うようなbelagが観察されなかったことから、付着物が逃げ面を流動する過程でトライボケミカル摩耗を抑制していた可能性が考えられる。ちなみに、belagによるトライボケミカル摩耗の抑制は、Ca以外のAl, Si, V系の酸化物においても類似の効果が報告されている<sup>4), 5)</sup>。つまり、Al, Si, V系の付着物が認められたNon-Ca旋削工具でもトライボケミカル摩耗が抑制されていたと考えられる。

#### 3.2 サーメット工具組織中のバインダ相劣化防止による硬質粒子の欠落抑制

Add-Ca旋削工具のEDXマッピング(図9)では、Caが濃化した部分が認められ、これがサーメット工具のバインダ相部分と一致しているように見える(図9中の赤丸)。ところで、付着する非金属介在物の種類によるバインダ相中成分の拡散状態に着目し、CaOを含む酸化物が付着した場合には、Coの拡散を抑制したり、MnSが付着した場合には、NiがMn, Sと低融点の固溶体を形成することからNiが拡散するという考えが提唱されている<sup>6)</sup>。そこで、図10に示す旋削工具逃げ面の表層部断面におけるバインダ相に相当する各点(黄丸の位置)においてEDXにて成分分析を行い、分析箇所から工具表面までの距離を画像上で測定し、バインダ相中のNi, Coと工具表面からの距離をプロットしたものを図11, 図12に示す。Add-Ca旋削工具はNon-Ca旋削工具に比べ逃げ面表層付近ではバインダ相中のNiおよびCoの濃度低下が抑制されており、いっぽう内部ではNon-Ca旋削工具とAdd-Ca旋削工具のバインダ相中のNiおよびCoの濃度は漸近する様子が認められる。

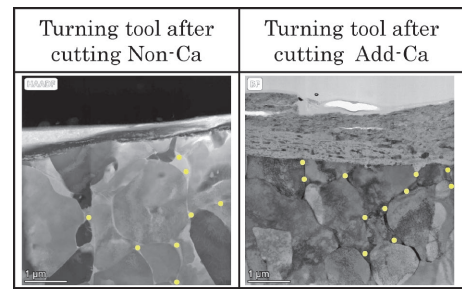


図10 旋削工具逃げ面の表層部断面におけるバインダ相の分析位置  
Fig.10 Analysis locations of the binder phase in the cross section of the surface layer on the flank face of the turning tool

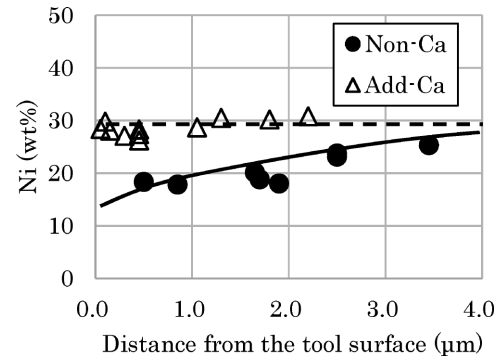


図11 旋削工具逃げ面のバインダ相中Ni量分析結果  
Fig.11 Analysis results of Ni content in the binder phase on the flank face of a turning tool

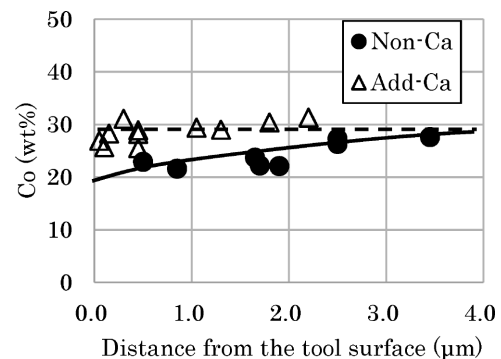


図12 旋削工具逃げ面のバインダ相中Co量分析結果  
Fig.12 Analysis results of Co content in the binder phase on the flank face of a turning tool

これらの結果より、図13に示すような工具摩耗を抑制する要因を推定した。まずNon-Ca旋削工具では、バインダ相中成分が拡散し硬質粒子を保持する力が弱まり、被削材との摩擦の過程で硬質粒子が欠落する。図7のNon-Ca旋削工具で認められたサブミクロン~数μmの凹みは、硬質粒子が欠落した痕跡の可能性が考えられる。いっぽうAdd-Ca旋削工具ではバインダ相中成分の拡散が抑制されることで硬質粒子を保持する力は弱まらず、従って被削材との摩擦過程での硬質粒子の欠落が抑制されたと考えられる。

#### 3.3 Caによる旋削工具摩耗の抑制メカニズム

今回の調査では、工具摩耗抑制の要因として以下の2点が考えられる。

- ①旋削工具刃先の切れ刃位置に堆積した酸化物および硫化物の一部が逃げ面側に流動し、その過程において逃げ面にbelagとして付着しトライボケミカル摩耗を抑

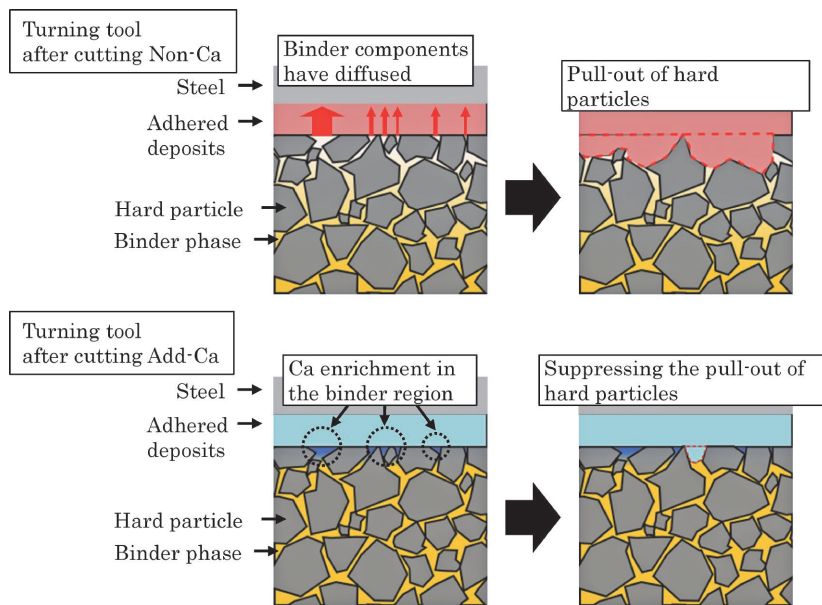


図13 バインダ相中成分の拡散防止による硬質粒子の欠落抑制メカニズム  
 Fig.13 Mechanism for suppressing hard particle pull-out by preventing diffusion of components in the binder phase

制。

②バインダ相部分に付着したCa系酸化物がバインダ相中成分の拡散を防止し、バインダ相の劣化を抑制することで、硬質粒子の欠落を抑制。

Non-Ca旋削工具とAdd-Ca旋削工具では付着物の組成に差異があり、これによるトライボケミカル摩耗の抑制力に違いが生じAdd-Ca旋削工具はNon-Ca旋削工具に対して工具摩耗が抑制されていた可能性も想定される。しかし、バインダ相中成分の拡散防止はAdd-Ca旋削工具にしか認められなかったことから、Add-Ca旋削工具は①②の効果が重畳してNon-Ca旋削工具よりも逃げ面の工具摩耗が抑制されていたと考えられる。

むすび=当社で開発した強度と被削性を両立したかち割りコンロッド用鋼では、高強度化に伴う被削性の悪化を抑制するためにCa量を制御している。このCaによる被削性悪化の抑制メカニズムを解明することを目的に、旋削工具刃先の状態や付着物に着目して考察を行った。

その結果、①旋削加工中に付着物が逃げ面側に流動し、その過程においてトライボケミカル摩耗を抑制、②バインダ相部分に付着したCa系酸化物がバインダ相中成分の拡散を防止し、バインダ相の劣化を抑制することで、硬質粒子の欠落を抑制、の二つの要因を明らかにした。そして、これらの効果が重畳して工具摩耗が抑制されている可能性を突き止めた。本かち割りコンロッド用鋼は、熱間鍛造用非調質鋼で世界最高レベルの強度と被削性を両立した鋼材であり、コンロッドを小型・軽量化しエンジンの高効率化に寄与することで、自動車のCO<sub>2</sub>排出量の削減が期待される。

#### 参考文献

- 1) 家口 浩. 熱処理. 2001, 41巻, 4号, p.190-195.
- 2) 古屋 論ほか. 2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集. 2004-3-16/18, 精密工学会, 2004, p.615-616.
- 3) 家口 浩. 第188・189回西山記念技術講座「特殊鋼棒線の最新の進歩」. 2006-6-1/15, 日本鉄鋼協会, 2006, p.191-205.
- 4) 白神哲夫. ふえらむ. 2020, Vol.25, No.6, p.18-23.
- 5) 福元志保ほか. 鉄と鋼. 2022, Vol.108, No.7, p.417-423.
- 6) 鳴瀧則彦ほか. 精密機械. 1982, 48巻, 4号, p.463-468.