研 究

工具の拡散摩耗に及ぼす鋼材中の 非金属介在物の効果 (第1報)*

——超硬あるいはサーメット工具と単一非金属介在物との反応——

鳴 瀧 則 彦** 山 根 八 洲 男***

Effect of Non-metallic Inclusions on the Diffusion
Wear of Cutting Tools (1st Report)

—Reaction between Simple Inclusions and
Carbide or Cermet Tools—

Norihiko NARUTAKI and Yasuo YAMANE

In order to clarify the effect of non metallic inclusions on the diffusion wear of cutting tools, diffusion tests were conducted among tool, inclusion and work material. The results obtained were as follows: FeO and MnS react with steel cutting grade

carbide tool and cermet tool seriously. Therefore, the layer consist of these inclusions has no suppressing effect for the tool-work interdiffusion. While gehlenite, Cr_2O_3 and TiO_2 hardly react with carbide tools, and they prevent the tool-work interdiffusion completely. MnO reacts with TiC in the tools but it also suppresses the tool-work interdiffusion.

Key words: non-metallic inclusion, diffusion, cutting tool, simple inclusion, carbide tool, cermet tool, tool-work interdiffusion.

1. 緒 論

鋼材に含まれる非金属介在物が鋼の被削性に影響を及ぼすことは古くから知られており¹⁾, これまでにも種々の非金属介在物について その効果が調べられている²⁾. 特に複合酸化物については, 高速切削時に工具寿命を著しく改善する場合があることから, 新しい快削性添加物として注目されている. しかし, これらの複合介在物はその組成のわずかな変化が工具寿命に大きな影響を及ぼすこともめずらしくない³⁾. したがってこれまで膨大な量の実験が行われているにもかかわらずいまだに不明な点も多く, 有効に作用する介在物を見つけ出すための実験も試行錯誤的に繰り返されているのが現状である.

本研究はいわゆる溶着, 拡散などが原因となっている熱的摩耗を対象とし, 中・高速切削域における鋼材の被削性を改善するには, どのような非金属介在物を, どのような形で, どの程度含有させれば良いかを明らかにすることを目的としている. 非金属介在物によって熱的摩耗を減少させるには, 工具と被削材間の溶着・拡散反応を防止する効果を持つ非金属介在物を切削中の工具表面に安定に推積させる必要がある. したがってこの目的のための介在物には二つの特性, ① 工具と被削材との溶着・拡散反応を阻止する性質, ② 工具表面に安定して付着する性質, が要求される. 本研究ではこの両方の性質

を同時に調べる手段として, 工具と被削材(鉄あるいは鋼)との間に各種の非金属介在物をはさんで拡散実験を行い, 各元素の拡散状態から非金属介在物の拡散防止作用や付着性について検討した.

本報では主として単体の非金属介在物について超硬およびサーメット工具の実験結果を述べ, 同結果をもとに非金属介在物の拡散防止作用と工具面付着機構について検討する.

2. 実 験 方 法

拡散実験は, 表面を $3\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストにて研磨した SNP 432 型工具と工具の間あるいは工具と被削材との間に粉末状の酸化物あるいは硫化物を薄く塗布した後, 黒鉛製の容器内で加熱温度 1200°C , 加熱時間 30 min, 加圧力 $6.1 \times 10^6 \text{ Pa}$ の一定条件下で行った. なお介在物と工具あるいは被削材との間に反応性がない場合は両者は剥離するが, 剥離した場合は改めて部分的に介在物を塗布して実験を行い, 塗布した部分について観察, 分析した.

実験後, 試料中央部を接合面に垂直に切断, 切断面をマイクロポリッシュ仕上し, 超硬との組合せについてはアルカリ溶液(H_2O_2 と10% NaOHを1:2に混合)と Nital による2段階腐食をした後, 顕微鏡観察を行った. 更に EPMA (島津 EMX-SM 型) により元素の拡散状況を調べた. 分析条件は O および C の分析では加速電圧 15 kV, 試料電流 0.1 μA , それ以外の元素の場合は 25 kV, 0.05 μA とした. ビーム径はいずれの場合も 2~3 μm 程度である. 分析は境界面に垂直に数か所について行い,

* 原稿受付 昭和56年2月12日. 昭和55年度精機学会春季大会学術講演会(昭和55年3月29日)にて発表.

** 正 会 員 広島大学工学部(広島市千田町3-8-2)

*** 正 会 員 広島電機大学(広島市安芸区瀬野川町中野595)

Table 1 Oxides and sulfide used in the experiments

Materials	Compositions
Gehlenite	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
FeO	Reagent (1st grade)
MnO	99%
Cr_2O_3	Reagent (1st grade)
TiO_2	99.9%
MnS	85% (The rest is MnO*)

* By X-ray analysis

代表的な例を分析結果として示した。なお分析位置は特に明示していないが、これは反応が界面全体についてほぼ均一に生じていたためである。したがって元素分析の結果は顕微鏡写真を示した部分における一般的な元素分布と考えて差し支えない。また工具から被削材へのCの拡散については、純鉄中のパーライトの増加を目安とした。

実験に使用した酸化物および硫化物を表1に示す。表中のゲレンナイトは複合酸化物であるが、組成に相当するCaO、 Al_2O_3 および SiO_2 の各粉末(試薬1級)を秤量、混合後アーク放電により溶解した後、粉碎して作成した。

3. 実験結果

3.1 酸化物との反応

1) ゲレンナイト

これまでになされた切削実験の結果によると、工具摩耗面にゲレンナイト組成を持つ酸化物が付着した場合、工具摩耗の進行が著しく遅くなることが報告されている³⁾。

図1に超硬P10-ゲレンナイト-S55Cの組合せでの拡散実験結果を示す。なおこの組合せでは工具と鋼との間にゲレンナイトを全面塗布した場合は互いに全く溶着しなかったことから、ゲレンナイトの工具に対する付着性はほとんどないと言える。顕微鏡写真で工具表面に約 $8\mu\text{m}$ の幅で带状に現れているのがゲレンナイト層である。写真から明らかなように、この層が存在する場合には一般の拡散実験⁴⁾で現れるような工具内部の反応層は全く見られない。更にEPMAによる分析でも、Fe、Coの拡散はほとんど認められない。したがってゲレンナイト層はFe、Coに対し強力な拡散防止効果があると言える。

2) FeO

FeOは鋼中の酸化物系介在物の平衡を考える上で非常に重要な酸化物であり、また切削実験においてもある

Fig. 1 Photo-micrograph and EPMA analysis data of diffusion coupled with a gehlenite layer between P 10 and S 55 C.
Specimen etched in alkali solution and Nital

Fig. 2 Diffusion test results of the couple with an FeO between P 10 and pure iron
Specimen etched in alkali solution and Nital

種の切削条件下において超硬工具のすくい面上にFeOが存在するとの報告⁵⁾がなされている。

図2に超硬P10-FeO-純鉄の組合せでの実験結果を示す。同組合せの場合はFeOを接合面の全面に塗布した場合も拡散対が互いに強固に溶着したことから、工具に対するFeOの付着性はかなり高いと判断できる。顕微鏡写真によれば、純鉄中にパーライトが認められることから、FeO層を通して工具から純鉄へCが拡散していることがわかる。またEPMAの分析結果も工具からFeO層内にW、Ti、Coの各元素が拡散していることを示している。以上の結果から、FeOは超硬工具に対しては、工

Fig. 3 Diffusion test results between FeO and cermet tool CT 1

Fig. 4 Diffusion test results of the couple with a MnO between P 10 and pure iron
Specimen etched in alkali solution and Nital

具に対する付着性は有するが、反応性が高く工具と被削材間の拡散反応を防止する効果はないと言える。

サーメット工具との反応については図3にCT1-FeO-CT1 (CT1はTiC系サーメット工具) と組み合わせた場合の実験結果を示す。顕微鏡写真によれば、境界部で

非常に激しい反応が生じ工具表面から炭化物粒子が分離し反応層内に流出している様子がわかる。また EPMA の分析結果によれば、FeO 層内には工具中の Ti, Ni が多量に流入していることがわかる。なおこれらの反応はサーメット工具と純鉄とを反応させた場合⁶⁾ に比べ非常に激しいものである。以上の結果から、FeO はサーメット工具に対し非常に高い反応性を有し、工具と被削材間の拡散反応を防止する効果はないばかりか、工具を弱化させる可能性を持つ酸化物であると言える。

3) MnO

Mn は Al, Si に並ぶ重要な脱酸剤であり、しばしば工具摩耗面に O あるいは S とともに検出される。また鋼中の Ti-Mn-O 複合介在物には工具摩耗防止効果があるとの報告⁷⁾ もなされている。

図4は超硬 P 10-MnO-純鉄の組合せによる実験結果である。顕微鏡写真によれば、純鉄中にパーライトが認められないことから、工具から純鉄への C の拡散は生じていないことがわかる。また明らかに区別できる層は3層あるが、工具に接した層は、一部 W, Co が認められるものの Ti, Mn, O の分析結果から考えて、Ti-Mn-O 複合酸化物を主体とした層であると考えられる。また中央の黒色層は、Mn, O 以外に Ti がわずかに検出されることから、実験に用いた MnO に Ti が固溶した層であることがわかる。更に黒色層の右の純鉄に接した層は、分析線図から、Mn が純鉄中に拡散侵入した層と考えられる。なお Fe および Co の拡散は MnO 層ではほぼ完全に阻止されている。以上の結果から MnO は超硬工具に対しては Ti を介し非常に反応しやすい酸化物であるが、FeO の場合とは異なり、反応層は W, Co に対し拡散防止効果を持つと言える。

サーメット工具との反応については図5に CT 1-MnO-CT 1 の実験結果を示す。顕微鏡写真では明らかに3層に区別できるが、中央の層は EPMA の分析結果から明らかなように MnO 層である。また MnO 層をはさみ形で生じている層は、Ni, C を含まず Ti, Mn, O (図では省略) のみ検出されていることから、超硬工具の場合と同様、Ti-Mn-O 複合酸化物層と考えられる。なお Mn は工具中の奥深くまで拡散しており、同図では省略しているが、工

Fig. 5 Diffusion test results between MnO and cermet tool CT 1

Fig. 6 Diffusion test results of the couple with a MnS between P 10 and pure iron
Specimen etched in alkali solution and Nital

具表面から約 300 μm 近くまで侵入していた。以上の結果から MnO はサーメット工具に対しても非常に反応性が高いことがわかる。

4) TiO_2 , Cr_2O_3

TiO_2 は脱酸剤として Ti を使用したときに生成され

る酸化物であるが、MnO が超硬工具やサーメット工具と溶着、反応するときに Ti 酸化物が非常に大きな役割をしているのはこれまで述べたとおりである。また Cr_2O_3 については被削性に悪影響を及ぼす可能性があるとの報告⁸⁾ もなされている。

TiO_2 に対しては P 10- TiO_2 -純鉄、 Cr_2O_3 に対しては P 10- Cr_2O_3 -S 55 C の組合せで実験した。実験結果は省略するが、いずれの場合も接合面全面に塗布した場合は全く溶着せず、また EPMA の分析結果も元素の拡散はほとんど生じていないことを示している。したがって TiO_2 , Cr_2O_3 はいずれも工具と被削材間の拡散反応防止効果は有するが、超硬工具に対する反応性は低いと言える。

3.2 硫化物との反応

硫化物としては MnS を用いて実験を行った。なお本実験に使用した MnS は純度 85% と表示されたもので、X 線回折によれば MnS 以外に MnO が検出された。

MnS は代表的な快削性介在物の一つであるが、快削効果は主として低速域において発揮され、100 m/min 以上の高速度域では必ずしも工具摩耗は改善されない⁷⁾ と言われている。

超硬工具との反応については、超硬 P 10-MnS-純鉄の組合せによる実験結果を図 6 に示す。顕微鏡写真によれば工具から純鉄への C の拡散が認められ、更に EPMA の分析結果からも MnS 層を通して Fe および Co の拡散が認められる。また Ti についても MnS 層への流出が見られ、Mn と同一位置で高濃度となっている。以上の結果から MnS は超硬工具に対しては非常に反応性が高く、工具と被削材間の拡散反応を防止する効果はほとんどないと言える。

サーメット工具との反応については、CT 1-MnS-CT 1 と組み合わせた場合の実験結果を図 7 に示す。顕微鏡写真では MnS 層内に工具表面の炭化物粒子が分離、流出している様子が見られ、非常に激しい反応が生じたこ

とが推定できる。また EPMA の分析結果も Ti, Ni が MnS 層内へ多量に流出したことを示している。ところで Mn-Ni 系、Ni-S 系状態図⁹⁾ によれば、Mn-Ni 固溶体の最低液相温度は約 1 000°C、Ni-S のそれは 637°C と、非常に低い液相温度を示す。したがって本実験では部分的

Fig.7 Diffusion test results between MnS and cermet tool CT 1

に液相が生じた可能性も十分に考えられる。以上の結果からMnSはサーメット工具に対してバインダーであるNiのみならず炭化物粒子をも分離、流出させるほど反応性が高いと言える。

4. 非金属介在物の拡散防止作用と工具面付着機構

緒論において述べたように、工具の熱的摩耗を減少させるには工具と被削材間の拡散反応を防止させる効果のある非金属介在物を工具表面に安定して付着させる必要がある。ところで実験結果から、超硬およびサーメット工具については、工具と被削材との拡散防止効果のある介在物は反応性が低く、逆に反応性の高い介在物は拡散防止効果はあまり期待できないと言える。なおMnOについては反応性と拡散防止効果の両方を兼ね備えているが、本来両者は相反する性質であり、MnO単独では有効に作用するのはある程度限られた範囲であると考えられる。したがってこれらの介在物はいずれも単独では摩耗抑制の効果は少なく、数種の効果の異なる介在物を適当に組み合わせることにより初めて工具に対する付着性と拡散防止効果を備えた介在物ができると言える。以下超硬およびサーメット工具に関しどのような介在物を組み合わせればよいかを検討してみる。

まず、工具面上に介在物を安定に付着させる点については、工具に対し反応性の高い介在物が必要である。ところでこれまで述べてきたように、超硬およびサーメット工具と非金属介在物との反応には工具中のTiCの酸化が大きな役割をしている。元素TiはOおよびCのいずれとも固溶体を形成し、しかも両者は互いに固溶し合う¹⁰⁾と言われているが、両者の標準自由エネルギー¹¹⁾は1200°CでTiCが約-40 kcal/mol、TiO₂が約-160 kcal/molとTiO₂の方が熱的にはるかに安定である。すなわちTiCは常にOと結びつき、より安定になろうとする傾向を有すると言える。したがって超硬およびサーメット工具に対する反応性(付着性)を持つ介在物とし

ては、TiCにOを供給し、しかもTi酸化物と安定な固溶体を作る介在物が好ましいと言える。

次に拡散防止性を有する介在物の条件としては、切削条件下である程度の可塑性を有し、被削材中のFeにより還元されることがなく、しかも工具との反応性を有する介在物と安定に結合する必要がある。以上の点からすれば、極端に融点の高いもの、あるいはFeOよりも不安定な酸化物は不適であろう。

どのような介在物の組合せが上記の条件を満足する可能性があるかを本実験の結果から推定すると、FeO、MnOあるいはMnS(含MnO)を反応性介在物として、Al₂O₃、SiO₂、CaO、TiO₂などを2種以上組み合わせた複合介在物が考えられる。なおこれらの複合介在物の実験結果については次報で報告する。ただしサーメット工具については実験結果にも見られたように、工具中のNiがMnあるいはSと低融点の固溶体を作ることから、Mn系介在物については注意を要する。

5. 結 論

鋼中に含まれる非金属介在物と超硬工具、サーメット工具および鋼との間で拡散実験を行い、工具と非金属介在物の反応、および非金属介在物が工具と被削材間の拡散反応に及ぼす影響について調べた。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 超硬工具に対しては、FeO、MnSは非常に反応性が高く工具と被削材間のFe、Co、Cなどの相互拡散を防止する効果はない。MnOは工具中のTiCを介し工具と反応するが、工具と被削材間の拡散防止効果を有する。ゲレナイト(2CaO・Al₂O₃・SiO₂)、Cr₂O₃、TiO₂は工具と被削材間の拡散防止効果は優れているが、MnOに比べ更に反応性は低い。
- (2) サーメット工具に対しては、FeO、MnSは非常に反応性が高く、工具と被削材間の相互拡散を防止する効果は期待できないばかりか、工具寿命に対して

は悪影響さえ及ぼす可能性がある。MnO は工具中の TiC を介し反応するが, MnS ほどの反応性は持たない。

- (3) 以上の結果から, 単一の介在物では工具に対する付着性と工具と被削材間の拡散防止効果の両方は期待できず, 工具と被削材間の溶着・拡散反応を防止し工具寿命を延長させるためには, 工具と被削材間の拡散防止効果を持つ介在物と, 工具に対し反応性を有しかつ拡散防止効果を持つ介在物と安定に結合する介在物を組み合わせた複合介在物とする必要がある。

参 考 文 献

- 1) W.König: Der Einfluß nichtmetallischer Einschlüsse auf die Zerspanbarkeit von unlegierten Baustählen (Teil I), Ind.-Anz., **87**, 26, (1965) 61.
- 2) 例えば, 赤澤正久, 黒岩和也: 脱酸調整削鋼について, 精密機械, **42**, 2 (1976) 94.
- 3) 切削加工専門委員会: S 45 C カルシウム脱酸鋼の被削性に及ぼす硫黄量の影響, 精密機械, **46**, 8 (1980) 1027.
- 4) N. Narutaki & Y. Yamane: Wear Mechanism of Carbide Tool Based on the Reaction between Tool and Work Material, Bull. JSPE, **10**, 3, (1976) 95.
- 5) W. König & N. Diederich: Cutting Fluids Improve Tool-life of Carbide Tools by Chemical Reactions, Ann. CIRP, **17**, (1969) 17.
- 6) 鳴瀧則彦, 山根八洲男: サーメット工具の熱的摩耗と切削性能, 精密機械, **46**, 4 (1980) 442.
- 7) 荒木 透: 鋼の被削性, 日本金属学会会報, **17**, 2 (1978) 94.
- 8) 精機学会切削性専門委員会: 13Cr 鋼-カルシウム脱酸鋼の被削性, 精密機械, **42**, 2 (1976) 120.
- 9) 日本金属学会編: 金属データブック, 丸善 (1974) 467, 553.
- 10) 西村透雄, 木村啓造: チタニウム-酸素-炭素三元平衡状態図の研究 (第 4 報), 日本金属学会誌, **20**, 10 (1956) 589.
- 11) 日本金属学会編: 金属データブック, 丸善 (1974) 81, 82, 84.

情 報

56 年の工作機需要・NC から MC へ

56 年の工作機械受注 (日本工作機械工業会加盟 68 社分) は 6 247 億 400 万円と 史上最高を記録した。受注ベースでみた数値制御 (NC) 化率は, 55 年の 49.8% から 56 年は 52.6% へと上昇, 一段と NC 工作機械への比重が強まっていることを示している。省力化, 合理化投資の決め手として期待されている NC 工作機械だが, 同じ NC 機でも需要構造に変化が生じてきていることが注目される。

まず, 旋盤は 55 年に比べ 9.3% 減の 1 507 億 9 300 万円だが, このうち NC 旋盤も同 8.2% 減の 1 086 億 7 600 万円と減少した。これに対し 55 年の場合, 旋盤は 54 年比 39.1% 増の 1 662 億 6 700 万円, うち NC 旋盤が 59.3% 増の 1 183 億 6 400 万円と大幅な伸びを示している。従って旋盤については NC 旋盤を含めて, 需要が高水準安定に移行していることがうかがえる。

一方, 工作機械各社が増産を進めているマシニングセンタ (MC) は, 56 年が 55 年比 13.5% 増の 1 227 億 7 900 万円と順調に伸びている。55 年では MC は前年比 71.3% 増の 1 081 億 8 100 万円へと急増している。

MC の伸び率は, 56 年に 55 年より減少したとはいえ, 依然上昇している。従って NC 工作機械の花形機種は, 従来の NC 旋盤から MC へと完全に移行していることが分かる。

このほか, NC 工作機械で, 56 年の受注が 55 年に比べて減少したのは, NC 中ぐり盤だけである。NC 中ぐり

盤は 55 年比 18.7% 減の 120 億 800 万円となっている。

ところが 55 年は前年比 54.9% 増の 147 億 7 500 万円と急増している。

中ぐり盤, NC 旋盤を除く NC 工作機械は, 56 年に順調に伸びたが, NC 研削盤, NC フライス盤の伸びが大きい。NC 研削盤は 55 年比 45.7% 増の 72 億 7 100 万円で, 55 年の伸び率 53.7% から下がったとはいえ, 依然上昇している。研削盤は, ソフトウェアの面で NC 化が難しいが, 今後メーカ各社の開発が進めば, NC 機も増え, 受注も急増するものとみられる。

また NC フライス盤も 55 年比 16.3% 増 342 億 9 800 万円となった。55 年の伸びは 54.9% であり, 伸び率は鈍化しているものの, 依然需要は根強い。

56 年の機種別の受注額は次の通り (括弧内は NC 機, 単位は百万円)。

旋盤=150 793—前年比 9.3% 減 (108 676—同 8.2% 減), ボール盤=4 592—同 8.9% 減 (1 413—同 3.1% 増), 中ぐり盤=33 715—同 14.6% 減 (12 008—同 18.7% 減), フライス盤=62 950—同 6.2% 増 (34 298—同 16.3% 増), 研削盤=80 742—同 8.4% 減 (7 271—同 45.7% 増), 歯車機械=17 115—同 7.8% 減 (183—同 2 950%, 約 30 倍増), 専用機=84 636—同 1.1% 増 (11 862—同 7.6% 増), MC=122 779—同 13.5% 増, 放電加工機 (56 年 9 月分から調査開始)=16 637 (11 200), その他 (平削り盤を含む)=50 745 (19 253)。(服部 敏夫)