ホブ切り用水溶性切削油剤に関する基礎的研究*

(第3報, pHの影響)

松岡 寛 憲^{*1}, 小野 肇^{*2}
劉 孝 宏^{*1}, 石部 泰 行^{*3}Fundamental Research on Water-Soluble Cutting Fluids for Hobbing
(3rd Report, Effect of pH)Hironori MATSUOKA^{*4}, Hajime ONO,
Takahiro RYU and Yasuyuki ISHIBE^{*4} Department of Mechanical and Energy Systems Engineering, Oita University,
700 Dannoharu, Oita-shi, Oita, 870-1192 Japan

This paper presents the influence of pH of water-soluble cutting fluids with and without synthetic lubricating additive for hobbing; Fluid A and Fluid B, on the cutting performance; flank wear, crater wear and finished surface roughness. Experiments were conducted by simulating hobbing by fly tool cutting on a milling machine. The following results were clarified: (1) When using both Fluid A and Fluid B, the flank wear decreases with decreasing pH, in which the Fluid A having pH 8.0 and the Fluid B having pH 9.0 showed the smallest flank wear width not only at cutting speed of 117 m/min, but also at 159 m/min. (2) The crater wear obtained with the Fluid A decreases with decreasing pH, but that obtained with the Fluid B increases with decreasing pH at cutting speed of 117 m/min. At 159 m/min, the crater wear could not be measured because of adhesion of deposited metal on the face. (3) The finished surface roughness is small from the beginning of cutting to the end of cutting in the case of pH 8.0 of the Fluid A at cutting speed of 117 m/min. It is big and shows no difference even when changing pH at 159 m/min. (4) From the view points of the tool wear and the finished surface roughness, pH 8.0 of the cutting fluid with synthetic lubricating additive is effective.

Key Words: Cutting, Gear, Hobbing, pH of Cutting Fluid, Hob Wear, Fly Tool, Flank Wear, Crater Wear, Finished Surface Roughness

1. 緒 言

近年, 作業環境の改善や地球環境汚染防止が叫ばれ, ホブ切りにおいても, ミストや臭気による作業環境の悪化や引火の危険性などの問題から, 不水溶性切削油剤の多量注油の使用が見直されつつある。その代替として, ドライ加工およびセミドライ加工とともに, 水溶性切削油剤の使用に対する要望も強まってきている。著者らも, ホブ切りを舞いツールにシミュレートして, 水溶性切削油剤に関する基礎研究の成果を報告しており, 高速切削(159 m/min)において, 工具寿命および仕上げ面粗さの点で, 従来の不水溶性切削油剤よりも優れた水溶性切削油剤があること⁽¹⁾, またポリアルキレングリコール系の合成潤滑添加剤を含むエマルジョン形の水溶性切削油剤が有効であること⁽²⁾などの知見を得ている。

水溶性切削油剤は一般に, 希釈液の pH 値が 8 から 10 程度のアルカリ性になるように設計されている⁽³⁾。これは工作物や工作機械に対する錆止め性, および腐敗防止などを付与するためである。pH 値は水溶性切削油剤の一般性状の中で最も重要な因子のひとつであり, それが錆止め性や人体に与える影響についてはすでに知られているが⁽⁴⁾, 切削性能に関してはほとんど報告されていない。

そこで本研究では, ホブ切り用水溶性切削油剤の pH 値を変化させ, pH 値の違いが切削性能に及ぼす影響について, 工具逃げ面摩耗, クレータ摩耗および仕上げ面粗さに及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験方法および実験条件

ホブ切りそのものでの実験では, ホブ摩耗に影響する因子が複雑であるから, 現象を単純化し, 実験の解析を容易にするために, ホブ切りをフライス盤での舞いツール切削に置き換えて実験を行った(図1参照)。ホブ切りと舞いツール切削との対応性については, 不水溶性切削油剤を多量注油した場合⁽⁵⁾で比較した結果であるが, 両者はほぼ合うことを確認しており, 舞

* 原稿受付 2008 年 12 月 17 日。

^{*1} 正員, 大分大学工学部(〒870-1192 大分市大字旦野原 700)。^{*2} ユシロ化学工業(株)(〒253-0193 神奈川県高座郡寒川町田端 1580)。^{*3} 学生員, 大分大学大学院工学研究科。

E-mail: hmatuoka@cc.oita-u.ac.jp

いツール切削での実験結果については、実機でのホブ切りに十分適応できるものと思われる。

実験で対象とした歯車はモジュール 3、歯数 42 枚の平歯車で、ホブは 3 条、右巻はホブである。フライス盤での実験条件を表 1 に示す。ホブ材質は高速度鋼工具 SKH 55 相当で、工具には TiN および (Al, Ti)N コーティングを、アークイオンプレーティング法により施した TiN 工具および (Al, Ti)N 工具を用い、すくい面のコーティング膜がない状態で実験を行った。それぞれのコーティング膜の厚さは約 5 μm である。被削材はクロムモリブデン鋼 SCM 415 (HB 143) で、その寸法は長さ 500 $\times$ 幅 100 $\times$ 厚さ 100 mm である。本実験では、フライス盤で溝 25 m (実験で対象とした歯車約 81 個分) を目標に切削したが、刃先が大きく損傷した時点で切削を中止した。切削速度は 117 m/min および 159 m/min である。

図 2 に工具刃先の損傷を示す。外周切れ刃の中央摩耗と外周角部摩耗、刃先丸み部と側面切れ刃の境界に生じる角摩耗およびすくい面のクレータ摩耗を測定した。クレータ摩耗は、図 3 に示すように舞いツールの軸に平行に 0.1 mm 間隔で 25 点を測定した。仕上げ面粗さは切削溝の底を切削方向に測定した。使用したフライス盤は日立精機製 2 MF 形 (万能形) である。

実験に使用した水溶性切削油剤 (以下、油剤と略称する) の一般性状を表 2 に示す。油剤 A (記号: Fluid A)、油剤 B (記号: Fluid B) とともにシンセティックソ

リューションであるが、油剤 A は非イオン系の合成潤滑添加剤と、カルボン酸のアルカリ塩とからなり、特に前者を多量に含有するため潤滑性に優れている。一方、油剤 B は非イオン系の合成潤滑添加剤を含まず、カルボン酸のアルカリ塩が主成分であるため、pH が比較的高く錆止め性が良好な油剤である。いずれの油剤も水道水で 20 倍に希釈し、塩酸を適量加えて pH を低めに調整した試料を数点ずつ作り、実験に用いた。なお、水道水 100% (pH 6.5) およびドライ切削でも実験を行い、油剤との比較を行った。油剤および水道水は、工具すくい面側から 2.4 L/min の割合で十分に注いだ。

3. 実験結果および考察

3.1 逃げ面摩耗 本実験での再現性を調べるため、いくつかの実験点について 2 回実験を行ったが、

Fig. 2 Wear at cutting edge

Fig. 3 Measurement position of crater wear

Fig. 1 Setting condition of the fly tool, work material and oil

Table 1 The same conditions as in the case of hobbing by fly tool cutting on milling machine

Hobbing		Fly tool cutting on milling machine	
3-thread hob	Feed of table	0.99 mm/rev	
		3.25 mm	
Feed of hob	3.0 mm/rev	For cutting corresponding to the gear	
Length of maximum chip	23.57 mm	Total number of revolutions (The sum of the approach distance and face width)	315
Thickness of maximum chip	0.27 mm	Length of groove to be cut	0.31 m

Note : The turning radius of the tip of fly tool is 85 mm.

Table 2 Property of water-soluble cutting fluids tested

Item		Fluid A	Fluid B
Appearance	Original	Light yellow	Light yellow
	$\times 20$	Transparency	Transparency
Specific gravity (15°C, g/cm ³)	Original	1.073	1.035
pH	$\times 20$	9.4	10.2
Surface tension (mN/m)	$\times 20$	40.3	49.1
Synthetic lubricating additive	Original	30 % <	—
Mineral oil	Original	—	—
EP additive	Original	—	—
Surface active agent	Original	—	—
Inhibitor	Original	5 ~ 10 %	10 ~ 20 %

各逃げ面摩耗幅の再現性は良好であった。

図4に油剤Aについて、逃げ面摩耗に及ぼすpHの影響を示す。切削速度は117 m/minである。TiN工具の場合、最大摩耗幅(中央、外周角部および角摩耗幅のうちの最大)で比較すると、pHが低くなるにつれて摩耗は減少する傾向にあり、pHが8.0の場合に摩耗は最も小さい。油剤のpHの効果を調べるために、水道水だけでの実験を行った。水道水の場合、pH 8.0の場合に比べて摩耗は大きい、pH 8.5の場合と同程度の摩耗幅を示しており、摩耗幅は激増すると思われたが、予想以上に効果が現れている。これは油剤よりも水道水のほうが熱伝導率が高く⁽⁶⁾、油剤の潤滑性能よりも冷却性能の点で優れているからだと思われる。しかしながら、水道水を使用した場合、供給を始めるとすぐに、被削材やフライス盤のテーブル上に錆が発生し、実用上使用することはできない。また、ドライ切削の場合、pH 8.0の場合と比べて摩耗は大きい、切削油剤が存在しないドライ切削でも十分切削が可能であることがわかる。これには熱応力が関係しているものと思われる、ホブ切り(舞いツール切削)は断続切削であり、油剤を使用した場合、工具切れ刃は切削時には切削熱により高温に加熱され、切り終わると同時に油剤により強制冷却されるため、刃先では加熱と冷却に伴う膨張と収縮の繰返しによる熱応力が大きい。これに対して、ドライ切削の場合、空転時は空気

による冷却であり、油剤に比べて空気の熱伝導率は小さいため、熱応力も小さくなり、摩耗はあまり増加しないと思われる。ドライ切削の効果について、著者の一人が硫黄系不水溶性切削油を使用した場合に比べて、摩耗幅は小さくなることを報告している⁽⁷⁾。

(Al, Ti)N工具の場合も、TiN工具と同様にpH値が低くなるにつれて摩耗は減少し、pHが8.0の場合に摩耗は最も小さい。pHが低い場合に摩耗減少効果が見られる理由として、主として錆止め成分として添加されているカルボン酸類の溶解性および吸着性が挙げられる。通常カルボン酸はアルカリ塩として油剤に配合され、水溶液中はカルボン酸陰イオンの形で溶解している。液のpHが下がると、カルボン酸陰イオンは水素イオンと結合して酸の形に戻り、溶解性が低下してくる。その結果、カルボン酸は固体表面、すなわち摩擦面近傍に析出し、吸着膜を形成しやすくなるものと推察される。錆止め成分として添加されているカルボン酸類は炭素数の少ない(鎖長の短い)物が多く、通常はあまり潤滑効果を示さないが、上記のように摩擦面に多量に析出すると、相応の吸着膜を形成し、固体接触を防ぐ働きをするものと思われる。しかしながら、ドライ切削の場合の逃げ面摩耗幅はpH 8.0の場合も小さく、十分切削は可能であるが、後述の仕上げ面粗さを考慮した場合、切削油剤を用いたほうがよいと思われる。また、物理的見地から、図5に例示するように、(Al, Ti)N工具において、pHが8.0と低い場合の摩耗形態は通常のアプレシブ摩耗と思われる

(a) TiN-coated tool

(b) (Al, Ti)N-coated tool

Fig. 4 Influence of pH on the flank wear (Fluid A, cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 25 m)

Fig. 5 Conditions of the side flank wear [Fluid A, (Al, Ti)N-coated tool, cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 25 m]

Fig. 6 Conditions of the deposited metal [Fluid A, (Al, Ti)N-coated tool, cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 0.5 m]

が、pH が 9.1 と高い場合は、突発的な大きな摩耗が発生している。これは溶着物が刃先上より脱落する際のはぎ取りによる凝着摩耗であると思われる。溶着物の付着状態については、図 6 に示すように、切削初期における両者の刃先の状態を観察した結果、pH が 8.0 の場合、刃先に溶着物の付着は見られないが、pH が 9.1 の場合、溶着物の付着が認められ、溶着物による凝着摩耗を示唆している。TiN 工具についても同様な傾向がある。

図 7 に、(Al, Ti)N 工具で摩耗幅に差が生じた pH 8.0, pH 9.1 および水道水の場合の最大摩耗の経過曲線を例示する。pH 8.0 および pH 9.1 の場合、切削溝長さ 5 m まではほぼ同じ摩耗幅を示すが、それ以降は摩耗増加割合が異なり、徐々に差が開いている。両者とも、切削始めより切削終了の切削溝 25 m までほぼ直線的に増加している。これに対して、水道水の場合、切削溝長さ 2 m で摩耗幅 0.1 mm に達するまでは初期摩耗が明瞭に現れており、溝長さ 25 m での摩耗幅の 3 分の 1 がこの溝長さまでに発生している。溝長さ 2 m 以降は切削終了まで直線的に増加している。摩耗の小さい pH 8.0 の場合には、摩耗幅 0.1 mm は溝長さ 12 m で発生しており、この時点では、水道水よりも pH 8.0 のほうが 6 倍も寿命が長いことがわかる。

以上より、pH が低いほうが摩耗は小さくなるので、さらに pH を小さくした場合に摩耗減少効果が期待できるが、pH が 8.0 よりも低い場合には錆が問題となり、実用上使用は不可能である。

図 8 は、切削速度 159 m/min における pH の影響を示す。TiN 工具の場合、pH を変えた実験では、溝長さ 3 m (歯車約 10 個分) を切削した。pH が 8.5 以下の場合に摩耗は小さく、pH が 9.1 と高くなると、摩耗は 2 倍以上に増加する。水道水だけの場合、切削

溝長さが 2.5 m と短いにもかかわらず、pH が 8.5 の場合に比べて、摩耗幅は 5 倍に増加している。ドライ切削の場合も、摩耗幅は大きい。切削速度 117 m/min の場合と比べて、pH の効果が顕著に現れている。(Al, Ti)N 工具において、pH が 8.0 と低い場合に、溝長さ 10 m (歯車約 32 個分) を切削しても、最大摩耗幅は 0.15 mm 程度で小さい。しかしながら、pH が高くなると切削溝長さは短いにもかかわらず、刃先に損傷が起こり、大きな摩耗幅を示した。水道水だけの場合、溝長さ 0.6 m を切削しただけで最大摩耗幅は 7 mm 以上に達している。ドライ切削においても、pH が 8.0 の場合の摩耗幅に比べて、切削溝長さが短いにもかかわらず、摩耗幅は大きい。

以上より、高速になると、潤滑性能が低い水道水やドライ切削では、刃先の損傷が大きく、ある程度潤滑性能をもった油剤が必要である。油剤 A で pH が低いほうの摩耗幅が小さいのは、前述のようにカルボン酸の摩擦面への析出量(吸着量)が増えたためと考えられる。

図 9 に、切削速度 159 m/min において、pH が 8.0, 9.1 および水道水の場合の最大逃げ面摩耗の写真を示す。pH が 8.0 の場合、欠けもなく安定した摩耗を示

(a) TiN-coated tool

(b) (Al, Ti)N-coated tool

Fig. 7 Progress curve of the maximum flank wear (TiN-coated tool, Fluid A, cutting speed of 117 m/min)

Fig. 8 Influence of pH on the flank wear (Fluid A, cutting speed of 159 m/min)

し、摩耗形態としてはアプレシブ摩耗と思われる。pH が 9.1 の場合、丸み部から側面切れ刃に、欠けが発生しており、溶着物の発生が多いことから、溶着物が脱落する際のはぎ取りによる凝着摩耗あるいは転移形の摩耗であると思われる。水道水の場合、切削溝 0.5 m までは、摩耗幅は 0.05 mm 程度と小さかったが、その後、わずか 0.1 m 切削後に刃先は急激に摩耗が進行し全損状態になった。この切削速度では水道水の冷却効果だけでは不十分であり、潤滑効果も期待できないため切削温度が上昇し、熱的損傷が顕著に現れたものと思われる。

pH が低いと錆の発生が問題になるので、油剤 A に

Fig. 9 Conditions of the maximum flank wear [(Al, Ti) N-coated tool, cutting speed of 159 m/min]

(a) TiN-coated tool

(b) (Al, Ti)N-coated tool

Fig. 10 Influence of pH on the flank wear (Fluid B, cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 25 m)

比べて pH が高い油剤 B について、pH の影響を調べた。図 10 に、逃げ面摩耗に及ぼす pH の影響を示す。切削速度は 117 m/min である。TiN 工具の場合、pH が低くなるにつれて摩耗は減少する傾向があり、pH が 9.0 と低い場合に摩耗は最も小さい。pH が 9.5 以上と高い場合は、水道水およびドライ切削の場合と比べてほとんど同じ摩耗幅を示した。また、油剤 A (図 4) に比べて合成潤滑添加剤を含有していない油剤 B のほうが摩耗は少なく、カルボン酸が多い油剤 B のほうがこの実験条件では有効であった。油剤 B の潤滑性能は、錆止め成分として用いられている中級カルボン酸が担っており、pH が 9.0 と低い場合に摩耗が小さいのは中級カルボン酸の効果が大きいものと推察される。(Al, Ti)N 工具の場合、TiN 工具と同様に pH 値が低くなるにつれて摩耗は減少し、pH が 9.0 の場合に摩耗は最も小さい。水道水の場合と比較しても、pH を変えた場合のほうが摩耗は小さい。しかしながら、ドライ切削に比べると、摩耗が小さい pH 9.0 の場合でも、摩耗はわずかに大きい。

図 11 に、油剤 B を用いて、(Al, Ti)N 工具の場合の側面切れ刃の摩耗を例示する。pH 9.0, pH 10.2 ともに、突発的な摩耗や欠けがなく、摩耗形態としては通常のアプレシブ摩耗と思われる。TiN 工具についても同様な傾向を示した。油剤 A に比べて油剤 B の場合、pH が高くても溶着物の発生はほとんど見られない。油剤 B はカルボン酸の含有量が多い油剤であるため、pH が高くてもカルボン酸が溶解しやすい(すなわち、摩擦面に吸着しにくい)条件下でも、十分な潤滑膜が形成されているものと推察される。

図 12 は、切削速度 159 m/min における油剤 B の pH の影響を示す。TiN 工具の場合、溝長さ 2 m (歯車約 6.5 個分)を切削した。pH が 9.0 の場合に摩耗幅は小さく、pH が 9.5 と高くなると摩耗は増加し、さらに pH が 10.2 と高くなっても、摩耗幅は pH 9.5 の場合とあまり変わらず、水道水の場合とほぼ同じ摩耗幅を示した。ドライ切削の場合、pH 9.0 の場合よ

Fig. 11 Conditions of the side flank wear [Fluid B, (Al, Ti)N-coated tool; cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 25 m]

りも摩耗幅は小さい。(Al, Ti)N 工具において, pH が 9.0 と低い場合に, 溝長さ 4 m (歯車約 13 個分) を切削して, 最大摩耗幅は 0.3 mm を超えている。しかしながら, pH が高くなると切削溝長さも短く, 水道水の場合に比べて摩耗幅は小さいが, pH が低い場合に比べて摩耗幅は大きくなる。ドライ切削の場合は, 同じ溝長さで pH が 9.0 の場合の摩耗幅よりも少し大きい程度である。

以上より, 高速の 159 m/min になると, 117 m/min の場合よりも切削溝長さは短くなるが, 117 m/min の場合と同様に, pH が 9.0 と低い場合に摩耗幅は小さい。また, 油剤 A を用いて 159 m/min の場合と比べると, 油剤 A のほうが切削溝長さも長く, 摩耗幅も小さく, 高速においては, 油剤 A の pH が 8.0 の場合に, 摩耗幅は小さく実用的である。高速で油剤 A のほうが良好な理由としては, 高温条件下では油剤 A に含まれる合成潤滑添加剤が曇点 (60~90°C) のため析出し, 粘度の高い潤滑液となり, これが潤滑効果を発揮している可能性がある。高温下ではカルボン酸の吸着膜は軟化して失効してしまう。逆に低温では, カル

ボン酸の吸着膜の効果が見込めるので, カルボン酸を多量に含む油剤 B のほうが有効に働いたと考えられる。前述したように, 本来は錆止め成分として加えられているカルボン酸であるが, 吸着膜による潤滑効果も発揮したのではないかと推察される。

3・2 クレータ摩耗 図 13 に, 油剤 A を用いた場合のクレータ摩耗深さに及ぼす pH の影響を示す。切削速度は 117 m/min である。溝 25 m 切削後のクレータ摩耗深さの最大値 (測定位置 25 点の中の最大, 図 3 参照) および平均値 (測定位置 25 点の平均) の比較である。TiN 工具, (Al, Ti)N 工具ともに, pH が低くなるにつれてクレータ摩耗は減少し, pH が 8.0 の場合にクレータ摩耗は最も小さく, 各 pH において, (Al, Ti)N 工具のほうがクレータ摩耗は小さい。これらの傾向は, 図 4 に示す逃げ面摩耗の傾向とよく似ている。水道水の場合と比較して, pH を変えた油剤のほうがクレータ摩耗は小さい。しかしながら, ドライ切削の場合, pH を変えた油剤の場合と比較してクレータ摩耗は同等かあるいは小さい。クレータ摩耗の挙動には溶着物の影響が大きいものと考えられるので, 切削初期での溶着物の付着状態について観察を行った。

(a) TiN-coated tool

(b) (Al, Ti)N-coated tool

Fig. 12 Influence of pH on the flank wear (Fluid B, cutting speed of 159 m/min)

(a) TiN-coated tool

(b) (Al, Ti)N-coated tool

Fig. 13 Influence of pH on the crater wear (Fluid A, cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 25 m)

図14に、TiN工具の切削初期でのすくい面の状態を示す。pHが8.0の場合、溶着物の付着は見られないが、pHが8.5では、溶着物が付着しており、pHが高くなるにつれて、溶着物の付着量は増加している。また、水道水の場合、切りくずとの接触部全面に溶着物が付着しており、溶着物の付着量が増加するにつれて、クレータ摩耗は大きくなる傾向があることがわかる。しかしながら、ドライ切削の場合も、溶着物の付着が確認できるが、pHを変えた油剤よりもクレータ摩耗は小さい。これら溶着物が付着した場合、クレータ摩耗発生のメカニズムが異なるものと思われる。

図15は、pHが9.1、水道水およびドライ切削でのクレータ摩耗形状の経時変化を示したものである。pHが9.1の場合、切削始めの切削溝0.5mでは、すくい面に溶着物の付着が見られる。溝10m切削後では、溶着物は消滅し、切りくずとの摩擦による通常の機械的摩耗であると思われる。切削終了の溝25m切削後では、さらに摩耗は進行し、刃先が削り取られている。水道水の場合、溝0.5m切削後では、pHが9.1の場合よりも溶着物の付着量が増加している。溝10m切削後では、クレータ摩耗の底に溶着物が脱落する際に、工具母材を持ち去った跡が確認され、凝着摩耗あるいは移着摩耗であると思われる。溝25m切削後では、さらに摩耗は進行し、溶着物による工具母材の持ち去り量が増加して、深いクレータ摩耗となっている。ドライ切削の場合、溝0.5m切削後では、

Fig. 14 Conditions of the deposited metal on the face (Fluid A, TiN-coated tool, cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 0.5 m)

pHが9.1の場合よりも溶着物の付着量は少ないようである。溝10m切削後では、クレータ部に溶着物の付着が見られ、溝25m切削後では、さらに摩耗は進行するが、クレータ部には溶着物の付着が確認でき、溶着物の保護作用によりクレータ摩耗の進行を妨げているものと思われる。

以上より、pHが9.1、水道水およびドライ切削におけるクレータ摩耗発生機構は、溶着物の付着量およびその性質によって異なると思われる。pHが9.1の場合、pHを変えても同様なクレータ摩耗形態を示し、発生する溶着物は柔らかく、脱着しやすいため、切削始めでは溶着物の影響を受け、凝着摩耗が見られる。しかしながら、ある程度クレータ摩耗が深くなると溶着物の発生は抑制され、工具母材は切りくずと直接接触しクレータ摩耗は増加しているものと考えられる。水道水の場合、発生する溶着物は過冷却が激しいために、硬くて脆く、溶着力も強いと考えられる。一方、ドライ切削の場合、発生する溶着物は熱衝撃が少ないためにねばく、堅固に付着し、剥がれ落ちにくいものと考えられる。

図16に、油剤Bを用いた場合のクレータ摩耗深さ

Fig. 15 Profiles of the crater wear (Fluid A, TiN-coated tool, cutting speed of 117 m/min)

(a) TiN-coated tool

(b) (Al, Ti)N-coated tool

Fig. 16 Influence of pH on the crater wear (Fluid B, cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 25 m)

に及ぼす pH の影響を示す。切削速度は 117 m/min である。TiN 工具, (Al, Ti)N 工具ともに, 油剤 A の場合とは逆に, pH が低くなるにつれてクレータ摩耗は増加し, pH が 10.2 と高い場合にクレータ摩耗は最も小さく, 各 pH において, TiN 工具および (Al, Ti)N 工具のクレータ摩耗深さはあまり変わらない。これらの傾向は, 図 9 に示す逃げ面摩耗の傾向と逆の傾向を示す。水道水の場合と比較して, TiN 工具では pH を変えた油剤のほうがクレータ摩耗は小さいが, (Al, Ti)N 工具では, pH が 10.2 の油剤だけが水道水よりもクレータ摩耗は小さい。しかしながら, ドライ切削の場合, pH を変えた油剤の場合と比較してクレータ摩耗は小さい。

図 17 に, TiN 工具で pH を変えた場合の切削初期でのすくい面の状態を示す。pH が 9.0 の場合, 溶着物の付着が見られ, pH が高くなるにつれて, 溶着物の付着量は減少している。溶着物の付着量が少ないほどクレータ摩耗は小さいことから, 溶着物が付着した場合にクレータ摩耗が大きい理由は, 溶着物が脱落する際の凝着摩耗によるものと思われる。

すくい面での切りくずの接触状態は, 接触長さを調べることにより推定される。図 18 は, 油剤の pH を変えた場合のすくい面の切りくず接触長さ(工具中央

Fig. 17 Conditions of the deposited metal on the face (Fluid B, TiN-coated tool, cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 0.5 m)

(a) TiN-coated tool

(b) (Al, Ti)N-coated tool

Fig. 18 Comparison of the contact length on the face (cutting speed of 117 m/min, cutting a groove of 25 m)

部での長さ)を示す。TiN 工具, (Al, Ti)N 工具ともに, 油剤 A の場合は, pH が低くなるにつれて接触長さは短くなり, 油剤 B の場合は, 逆に pH が高くなるにつれて短くなり, 両油剤ともクレータ摩耗の傾向とよく似ている。旋盤での外丸削りにおいて, 接触長さが短いとせん断角は大きくなる⁽⁸⁾ことが明らかにされており, 理論的にもせん断角が大きいほうが切削は良好である。したがって, クレータ摩耗に対しては, 油剤 A の pH が 8.0 と低い場合, 油剤 B の pH が 10.2 と高い場合が有利であることがわかる。

3.3 仕上げ面粗さ 図19に、切削速度117 m/minにおける油剤AのpHを変えた場合の仕上げ面粗さ R_z の経過曲線を示す。TiN工具でpHが8.0の場合、切削始めより切削溝長さ5 mまで、仕上げ面粗さは4~6 μm であるが、切削溝10 m以降は、理論粗さの1.4 μm に近い2 μm 程度の小さな値を示した。これに対して、pHが8.5および9.1の場合、切削溝3~4 mまでは、粗さは25 μm 以上の大きな値を示すが、その後、粗さは3 μm 程度に激減する。水道水およびドライ切削の場合、ある程度の切削溝長さまで仕上げ面粗さは大きい、その後減少し、4 μm と小さくなる。仕上げ面粗さが減少する理由として、溶着物の付着が影響しているものと思われる。図20は油剤AのpHが8.5の場合のすくい面上の溶着物の付着状態を調べたもので、仕上げ面粗さが大きい切削溝4 mにおいて、切れ刃には溶着物の付着が見られるが、粗さが小さくなった溝長さ5 mにおいては、溶着物の付着は見られない。また、粗さにはクレータ摩耗の影響も大きく関係していると考えられる。クレータ摩耗がある程度深くなると、工具のチップブレイカのような役目をして切りくずの流れをスムーズにするため、仕上げ面粗さが良好になるとと思われる。仕上げ面粗さは、

pHが8.0の場合に切削始めより良好である。(Al, Ti)N工具の場合もTiN工具の場合と同様な傾向を示し、pHが8.0の場合に、仕上げ面粗さは良好である。

図21に、油剤Bを用いた場合の仕上げ面粗さの経過曲線を示す。TiN工具の場合、pHが高くなるにつれて仕上げ面粗さが激減するまでの切削溝長さが長くなっており、pHが9.0の場合に粗さが激減するまでの溝長さはもっとも短い。これに対して(Al, Ti)N工具の場合、pHが10.2では、切削初期では粗さは小さいが、切削溝3.5 mにおいて粗さが急増し、その後溝長さ23.5 mまで減少傾向を示すが、粗さは大きい。その後溝長さ24 mにおいて、粗さは激減する。pHが9.0および9.5では、切削始めより仕上げ面粗さは

Fig. 20 Conditions of the deposited metal on the face (Fluid A, pH 8.5, TiN-coated tool, cutting speed of 117 m/min)

(a) TiN-coated tool

(b) (Al, Ti)N-coated tool

Fig. 19 Progress curves of the surface roughness (Fluid A, cutting speed of 117 m/min)

(a) TiN-coated tool

(b) (Al, Ti)N-coated tool

Fig. 21 Progress curves of the surface roughness (Fluids B, cutting speed of 117 m/min)

良好であり、切削溝長さ 5 m 以降は、粗さは理論粗さに近い値を示す。

高速の 159 m/min における仕上げ面粗さについては、各条件での切削溝長さが異なり、溝長さも短いために、図は示していないが、pH を変えても仕上げ面粗さは大きく、有意差はあまり見られなかった。

以上より、両油剤、両コーティング工具とも、pH が低い場合に仕上げ面粗さは小さく、特に油剤 A の pH が 8.0 と低い場合に、仕上げ面粗さは良好である。

4. 結 言

ホブ切りをシミュレートした舞いツール切削において、TiN および (Al, Ti)N コーティング工具を用いて、切削速度を変えた場合、水溶性切削油剤の pH の影響を、逃げ面摩耗、クレータ摩耗および仕上げ面粗さから検討した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 切削速度 117 m/min において、合成潤滑添加剤を含む油剤、含まない油剤ともに、pH が低くなるにつれて逃げ面摩耗幅は減少し、高速の 159 m/min においても、合成潤滑添加剤を含む油剤の場合は、pH が 8.0 がよく、合成潤滑添加剤を含まない油剤の場合は、pH が 9.0 がよい。

(2) 切削速度 117 m/min において、合成潤滑添加剤を含む油剤の場合、pH が低くなるにつれてクレータ摩耗は小さくなるが、合成潤滑添加剤を含まない油剤の場合は、逆に pH が高くなるにつれてクレータ摩耗は小さくなる。高速の 159 m/min では、すくい面に溶着物が付着したため、クレータ摩耗の測定はできなかった。

(3) 切削速度 117 m/min における仕上げ面粗さは、合成潤滑添加剤を含む油剤の pH が 8.0 の場合に、切削始めより良好であり、切削終了時においても小さ

な値を示した。高速の 159 m/min では、pH を変えても仕上げ面粗さは大きく、有意差はあまり見られなかった。

(4) 逃げ面摩耗、クレータ摩耗および仕上げ面粗さより、合成潤滑添加剤を含む油剤の pH は 8.0 が有効である。

終わりに、本研究に対し切削工具を提供していただいた三菱マテリアル(株)に謝意を表する。

文 献

- (1) Matsuoka, H., Ono, H. and Tsuda, Y., Fundamental Reserch on Water-Soluble Cutting Fluids for Hobbing (1st Report, Comparison of Performance with Water-Insoluble Cutting Oils), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 68, No. 671 (2002), pp. 2188-2195.
- (2) Matsuoka, H., Ono, H. and Tsuda, Y., Fundamental Research on Water-Soluble Cutting Fluids for Hobbing (2nd Report, Cutting Preformance of Various Emulsions), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 719 (2006), pp. 2299-2307.
- (3) Hiroi, S. and Nakayama, Y., *Cutting Fluids and Grinding Fluids* (in Japaease), (1982), p. 241, Saiwaisyobo.
- (4) Takeyama, H., *Cutting and Grinding Fluids* (in Japanese), (1975), p. 108, Kogyo Chosakai Publishing.
- (5) Katsuki, A. and Matsuoka, H., Correspondence in Tool Wear between Hobbing and Cutting Using a Fly-Tool, *Report of the Faculty of Engineering*, Oita University, No. 23 (1991), pp. 7-13.
- (6) Kuroi, N., Waste Water Treatable Synthetic Cutting Fluid—Yushiroken Synthetic #660— (in Japanese), *Tool Engineer*, Vol. 41, No. 9 (1997), pp. 22-26.
- (7) Matsuoka, H. and Tsuda, Y., Fundamental Research on Behavior of Crater Wear of Hob in Dry Hobbing, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 66, No. 646 (2000), pp. 2038-2046.
- (8) Takeyama, H., *Cutting Processings* (in Japanese), (1982), p. 31, Maruzen.