ドライホブ切りにおける被削材種を変えた場合の 各種高速度鋼ホブのクレータ摩耗挙動*

— 舞いツールによる基礎実験 —

松 岡 寛 憲** 津 田 吉 広**

Behavior of Crater Wear in Dry Hobbing of Different Work Materials with Various High-Speed Steel Hobs
- Fundamental Experiments Using Fly Tools -

Hironori MATSUOKA and Yoshihiro TSUDA

This paper aims at investigating the influence of (Al,Ti)N coated high-speed steel (HSS) hob materials on the behavior of crater wear when changing the kinds of work materials in dry hobbing. Experiments were carried out using a fly tool. As a consequence, the following points were clarified: (1) The three kinds of HSS hob substrates tested showed the small depth of crater wear when cutting the work material of SCM415. (2) It was suggested that the crater wear reduction, when cutting the SCM415, is caused by the deposited metal covering the contact surface. (3) Among the tool materials tested, the corresponding to SKH55+(Al,Ti)N coated tool is suitable irrespective of the change in the work materials, in terms of the crater wear, the flank wear and the surface finished in dry hobbing.

Key words : cutting, dry hobbing, hob material, work material, fly tool, tool wear, crater wear, finished surface roughness

1. 緒 言

近年、作業環境や地球環境の改善の点から、切削油を使用しないドライホブ切り、特に高速度鋼ホブによるドライホブ切りの技術開発の要望が高まってきている。ホブ切りにおいて、ホブの逃げ面摩耗は、コーティングを施すことにより低減できるが、通常、ホブはすくい面を再研削し、コーティング膜は取り除かれて使用される場合が多いので、クレータ摩耗も逃げ面摩耗と同様に工具寿命を決定する重要な因子である。最近ではすくい面に再コーティングして使用する場合も出てきているが、まだその使用は少ないようである。切りくずと直接接触するすくい面上では、切削油(潤滑の働き)が存在しないドライホブ切りにおいては、特にクレータ摩耗が問題になると考えられる。

著者らは、高速度鋼ホブによるドライホブ切りにおいて、主としてすくい面のクレータ摩耗の挙動に及ぼすホブ材質およびコーティング材質の影響¹⁾、切削速度の影響²⁾、ホブ条数およびホブ送りの影響³⁾などについて検討を行い、ドライホブ切りの可能性を追究してきている。

一般に、自動車用歯車材として、クロムモリブデン鋼など数種類の材料が使用されており、ホブ摩耗に及ぼす歯車材種の影響は大きいことが報告されている⁴⁾。しかしながら、歯車材種の違いによるクレータ摩耗の挙動の違いについての研究報告はほとんど見当たらない。したがって、ドライホブ切りの検討を行う上で、歯車材種を変えた場合に、この挙動を調べ、どのような種類のホブ材質が適しているかを検討する必要がある。

本研究では、歯車材種(被削材種)を変えた場合、ホブ母材の違いによる工具すくい面のクレータ摩耗の発生機構を重点的に調べ、逃げ面摩耗および仕上げ面粗さについても検討を行い、ドライホブ切りにおける被削材種とホブ材質との適した組合せについての一指針を与えるものである。

2. 実験方法および実験条件

実験方法としては、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。クレータ摩耗および逃げ面摩耗のホブ切りと舞いツール切削との対応については、舞いツール切削のほうがクレータ摩耗は大きく現れ、絶対値は少し異なり、また逃げ面摩耗は両者においてほぼ合うことを確認しており²⁾、舞いツール切削の実験結果は実機でのホブ切りにも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、右巻ホブである。フライス盤での実験条件を表1に示す。本実験では、フライス盤で溝10mmを切削したが、これは実験の対象とした歯車32.3個分に相当する。ホブ材質として、高速度鋼工具の溶解材2種(SKH55相当とM34)および粉末材1種(SKH10)の舞いツールを製作した。化学成分と硬さを表2に示す。それらの材質に(Al,Ti)Nコーティングを、アーキオンプレーティング法により施したが、本実験では、すくい面のクレータ摩耗の挙動を調べるため、また現場ではすくい面のコーティングなしで使用される場合が多いので、すくい面にコーティングがない状態で使用した。コーティング膜の厚さは約5μmである。被削材は、歯車材としてよく使用されているクロムモリブデン鋼SCM415とSCM435およびクロム鋼

Table 1 Conditions in fly tool cutting on milling machine
(modified to match with hobbing)

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

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

* 原稿受付 平成14年5月13日

** 正 会 員 大分大学工学部(大分市大字旦野原700)

Table 2 Chemical composition and hardness of high-speed steel tools

Kind	Mark	JIS	AISI	Composition %						Rockwell hardness HRC
				C	W	Mo	Cr	V	Co	
HSS	A	Corresponding to SKH 55		1.05	6.0	6.0	4.0	2.5	5.0	67
	B		M 34	0.9	2.0	8.0	4.0	2.0	8.0	65
PM-HSS	C	SKH 10	T 15	1.5	12.0	—	4.0	5.0	5.0	65.5

Fig.1 Wear at cutting edge

Table 3 Chemical composition of work materials

Kind	Chemical composition %							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
SCM 415	0.14	0.26	0.78	0.023	0.017	0.03	1.13	0.24
SCM 435	0.33	0.28	0.70	0.013	0.023	0.01	1.06	0.19
SCr 420	0.20	0.25	0.73	0.019	0.015	0.01	1.05	—

SCr420を選んだ。それらの化学成分を表3に示す。また硬さはHB155程度である。寸法は長さ500×幅100×厚さ100mmである。切削速度は117m/minとした。

工具摩耗は図1に示すように、すくい面のクレータ摩耗、逃げ面の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を測定した。クレータ摩耗は、図2に示すように、舞いツールの軸に平行に、左右の角摩耗が発生する刃先丸み部と側面切れ刃の境界部の間を、0.1mm間隔で25点測定した。クレータ摩耗および切削溝の底の仕上げ面粗さは、粗さ・形状測定器により測定を行った。使用したフライス盤は日立精機製2MF形(万能形)である。

3. 実験結果および考察

本実験での再現性を確かめるため、いくつかの条件で2回実験を行ったが、クレータ摩耗深さおよび逃げ面摩耗幅の再現性は良好であった。

3.1 クレータ摩耗

図3は、被削材の種類を変えた場合の各種工具のクレータ摩耗深さの比較である。クレータ摩耗深さの最大値(測定位置25点中の最大)および平均値(測定位置25点の平均)を示す。被削材種の中では、工具材質を変えても、クレータ摩耗はSCM415を使用した場合に最も小さく、次にSCr420、SCM435の順に大きくなり、被削材種の違いによりクレータ摩耗深さは大きく異なっている。また工具材質の中では、工具A(溶解材SKH55相当)の場合が、クレータ摩耗は最も小さく、次に工具B(溶解材M34)、工具C(粉末材SKH10)の順に大きくなっており、実験したすべての被削材種に対して、同様な序列を示した。

ここで、被削材種および工具材質の違いによってクレータ摩耗挙動の違いを調べるため、クレータ摩耗深さに大きな差が現れた被削材SCM415およびSCM435について比較検討を行った。図4に、SCM415およびSCM435を切削した場合の各種工具のすくい面の状態を示す。溝10m切削後の場合である。SCM415の場合、工具AおよびBでは、刃先付近において切りくずの擦った跡(以下、擦り跡と略す)が見られるが、刃先から離れたクレータの左右に、切りくずが排出される時に溶着物により母材がむしり取られたような跡(以下、むしれ跡と略す)が確認できる。また、クレータ摩耗の境界線があまりはっきり現れていない。工具Cでは、刃先付近での擦り跡があまりはっきり現れておらず、またむしれ跡の状態も異なっており、クレータ摩耗の境界線がはっきり確認でき、全体的にクレータ摩耗面

Fig.2 Measuring position of crater wear

Fig.3 Influence of hob materials on the depth of crater wear when changing the kinds of work materials (feed 0.99mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117m/min, cutting length of groove 10m)

は滑らかなように見える。これに対してSCM435の場合、工具AおよびBでは、刃先付近に擦り跡が確認できるが、全体的にむしれ跡が多く見られる。工具Cでは、刃先付近での擦り跡があまりはっきり現れておらず、またむしれ跡の状態も異なっており、全体的にクレータ摩耗面は滑らかなように見える。

図5に、各種工具の最大クレータ摩耗形状を示す。溝10m切削後の場合である。SCM415の場合、各種工具とも、よく似た形状を示しており、クレータの底に溶着物が付着しているような突起物が見られる。これに対して、SCM435の場合、溶着物のような突起物は見られず、滑らかなクレータ形状を示している。各種工具とも、形状はよく似ているが、クレータ摩耗深さは異なる。

溶着物の発生を確認するため、クレータ摩耗の断面を調べた。図6は、工具Aで被削材SCM415を切削した場合、溝10m切削後のクレータ摩耗断面の顕微鏡写真である。明らかに工具母材の表面に、溶着物の付着が見られ、その厚さは約0.05mmである。この溶着物は全クレータ領域を覆っているわけではないが、その保護作用により、見かけのクレータ摩耗は小さく現れるものと思われる。この溶着物の成分分析は行っていないが、広井ら⁹⁾は、構成刃先により刃先が保護されるので、工具寿命が長くなる場合があるとしており、構成刃先などの溶着物

Fig.4 Conditions of the face (feed 0.99mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117m/min, cutting length of groove 10m)

Fig.5 Comparison of maximum crater wear profiles (feed 0.99mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117m/min, cutting length of groove 10m)

によりクレータ摩耗の進行を妨げていることが考えられる。また、 MnO_2 などの微細な酸化物は、切削中の工具表面で拡散による摩耗を阻止する保護層(ベラーク)を形成する⁶⁾と言われており、この保護層の効果も考えられる。

クレータ摩耗に大きな差が生じた工具 C を用いて被削材 SCM415 および SCM435 を切削した場合の切りくず裏面の写真を図 7 に例示する。SCM415 の場合、工具すくい面との接触傷

Fig.6 Cross section of the crater wear (Tool A, SCM415, feed 0.99mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117m/min, cutting length of groove 10m)

に沿って、部分的に溶着物の付着が確認される。これに対して、SCM435 の場合、接触傷は確認できるが、溶着物の付着はあまり見られない。他の工具についても同様な結果を得ており、SCM415 を切削した場合に、溶着物が発生しやすく、その付着によりクレータ摩耗が小さく現れることを裏付けている。

さらに、SCM415 材をドライ切削した場合、溶着物が発生しやすいことを確かめるため、著者らの一連の実験で性能がよかったマシン油 23 に硫化脂肪油(添加濃度 10 重量%, 硫黄分 1%)⁷⁾を添加した切削油を用いて、ドライ切削との比較実験を行った。図 8 は、工具 A で被削材 SCM415 を溝 15m 切削した場合のドライ切削(Dry)と湿式切削(Wet)の比較である。図 8(a)より、ドライ切削でのクレータ摩耗深さは、湿式切削に比べて約 3 分の 1 となり、かなり小さい。図 8(b)および(c)より、ドライ切削の場合、クレータに溶着物が付着して、見かけのクレータ摩耗は小さいようであるが、湿式切削では、油剤の反溶着作用により溶着物の付着は見られず、クレータ形状も滑らかで深いことがわかる。また、クレータ摩耗は、ドライ切削よりも湿式

切削のほうが大きく現れることが報告されており⁸⁾、その理由として、湿式切削の場合、パーライト、フェライトのせん断により生成された層状の組織が観察されるが、ドライ切削の場合、それに加えて、ホブのすくい面側での粒状の組織が観察される。これらより、ドライ切削時に、高温高圧下で変態した切りくずの組織は、切りくずとすくい面間に生じる摩擦に対して強度を維持できず、分断されやすくなり、その一部がすくい面に付着したものと考えられると考察している⁸⁾。

工具すくい面における切りくずの接触状態は、すくい面の切りくず接触長さおよび切削比を調べることにより推定される。ここで、切削比は切り出された切りくず長さ(切りくず5個の平均)を切り取り長さ(Uncut chip length: 23.57mm)で割った値で求めた。図9(a)は、被削材SCM415およびSCM435を切削した場合、各種工具で得られたすくい面の切りくず接触長さ(工具中央部での長さ)を示す。溝10m切削後の場合である。各種工具とも、SCM415の場合が切りくず接触長さが短い。またそれぞれの被削材に対して、工具A、B、Cの順に接触長さは長くなる。図9(b)は切削比を示す。各種工具とも、SCM415のほうが切削比が大きく、またそれぞれの被削材に対して、工具A、B、Cの順に切削比は小さくなる。

ここで、切りくず接触長さとして見た場合、切りくず接触長さが短くなるにつれて切削比は大きくなり、切りくず接触長さとして見た場合、切りくず接触長さが短いほうが、また切削比が大きいほうが、クレータ摩耗は小さく、工具AでSCM415を切削した場合、切削状態は良好であることを示唆している。また切削比が大きいことより、せん断角が大きくなっていることが推測され、旋盤での外丸削りにおいて、切りくず接触長さが短いとせん断角が大きくなる¹⁰⁾ことが明らかにされており、理論的にも切りくず接触長さが短いほうが切削は良好である。

3.2 逃げ面摩耗

図10に、被削材種を変えた場合の各種工具材質の逃げ面摩耗の比較を示す。溝10m切削後の場合である。SCM415の場合、各種工具とも逃げ面摩耗幅はほとんど同じで優位差はない。これに対してSCM435およびSCr420の場合は、工具Aが逃げ面摩耗は最も小さく、次に工具B、工具Cの順に大きくなる。被削材種を変えても工具Aが適している。図3のクレータ摩耗と比較した場合、クレータ摩耗が大きいほうが逃げ面摩耗も大きいことがわかり、逃げ面摩耗とクレータ摩耗の間には相関関係が認められる。

Fig.7 Condition of the back of cutting chip (Tool C, feed 0.99mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117m/min, cutting length of groove 10 m)

(a) Depth of crater wear

(b) Conditions of crater wear

(c) Profiles of maximum crater wear

Wet : Machine oil 23 + Sulfurized fatty oil (S:1%)

Fig.8 Comparison of dry cutting and wet cutting (Tool A, feed 0.99 mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117m/min, cutting length of groove 15m)

(a) Contact length

(b) Cutting ratio

Fig.9 Contact length on the face and cutting ratio (feed 0.99mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117m/min, cutting length of groove 10m)

Fig.10 Comparison of the flank wear (feed 0.99mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117m/min, cutting length of groove 10m)

Fig.11 Ratio of maximum depth of crater wear/maximum width of flank wear (feed 0.99mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117 m/min, cutting length of groove 10m)

Fig.12 Comparison of surface roughness (feed 0.99mm/rev, depth of cut 3.25mm, cutting speed 117m/min, cutting length of groove 10m)

ここで、被削材種および工具材種の違いにより、すくい面クレータ摩耗および逃げ面摩耗のどちらが大きき摩耗するかを調べるため、溝10m切削後において、最大クレータ摩耗深さを最大逃げ面摩耗幅で割った値を図11に示す。図中の1.0の数値は、最大クレータ摩耗深さと最大逃げ面摩耗幅の値が同じであることを示す。SCM415の場合、工具材質を変えても、クレータ摩耗よりも逃げ面摩耗のほうが大きく現れている。一方SCM435の場合、各種工具ともクレータ摩耗のほうが大きい。またSCr420の場合、クレータ摩耗深さと逃げ面摩耗幅はほぼ同じである。

3.3 仕上げ面粗さ

図12に、各種工具を用いた場合の被削材種の違いによる切削溝の仕上げ面粗さの比較を示す。切削始めおよび溝10m切削後の粗さである。被削材SCM415の場合、各種工具とも、仕上げ面粗さは良好である。SCM435の場合、工具Aでは粗さは小さいが、工具BおよびCの場合、切削始めにおいて、仕上げ面粗さが10~13 μ m程度と大きく、溝10m切削後には、粗さは2分の1から3分の1程度に小さくなるのが特徴的である。また、SCr420の場合もSCM435の場合と同様な傾向である。切削始めよりも溝10m切削後の粗さが小さい理由は、すくい面のクレータ摩耗が大きく関係していると思われる、ある程度クレータ摩耗が深くなると、すくい角が大きくなり、切りくずの流れをスムーズにし、溶着物などの発生を少なくするためと推察される。実験に用いた各種被削材に対して、工具Aが仕上げ面粗さを小さくする。

4. 結 言

ドライホブ切りにおいて、被削材の種類を変えた場合、ホブ母材の違いによる工具クレータ摩耗の挙動を主に、逃げ面摩耗および仕上げ面粗さについて調べた結果、次のことが明らかになった。

(1)被削材種を変えた場合、実験に用いた3種類の工具材質において、被削材SCM415を使用した場合に、クレータ摩耗は最も小さく、次にSCr420、SCM435の順に大きくなる。また工具材質の中では、溶解材SKH55相当の場合が、クレータ摩耗は最も小さく、次に溶解材M34、粉末材SKH10の順に大きくなり、実験した3種類の被削材に対して、同様な序列を示した。

(2)被削材SCM415において、クレータ摩耗が小さいのは、クレータ摩耗形状、クレータ断面の顕微鏡写真および切りくず裏面の観察より、クレータに付着した溶着物が、その進行を妨げていることが示唆された。

(3)クレータ摩耗、逃げ面摩耗および仕上げ面粗さから、被削材種を変えても、SKH55相当の母材に(Al,Ti)Nコーティングを施した工具が適している。

終わりに、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)の助成およびMMCコベルコツール(株)からの援助を受けて行われたことを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 松岡寛憲, 津田吉広: ドライホブ切りにおけるホブクレータ摩耗の挙動に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集C編, 66, 646 (2000) 2038.
- 2) 松岡寛憲, 津田吉広: ドライホブ切りにおけるホブクレータ摩耗の挙動に関する基礎的研究 (第2報, 切削速度の影響), 日本機械学会論文集C編, 66, 648 (2000) 2832.
- 3) 松岡寛憲, 津田吉広: ドライホブ切りにおけるホブクレータ摩耗の挙動に関する基礎的研究 (第3報, ホブ条数およびホブ送りの影響), 日本機械学会論文集C編, 67, 654 (2001) 533.
- 4) 仙波正荘: 歯車, 第6巻, 日刊工業新聞社, (1985) 216.
- 5) 広井進, 山中康夫: 切削油剤と研削油剤, 幸書房, (1982) 4.
- 6) 会田俊夫, 井川直哉, 岩田一明, 岡村健二郎, 中島利勝, 星鐵太郎: 切削工学, コロナ社, (1973) 314.
- 7) 松岡寛憲, 小野肇, 津田吉広, 後藤幸紀: コーティングホブに対する非塩素系切削油添加剤の工具摩耗防止効果, 日本機械学会論文集C編, 65, 633 (1999) 2102.
- 8) 切削油技術研究会: ドライ, ミスト, ウェット加工の実態を探る—ドライ加工はどこまで可能か—, 切削油技術研究会総会資料, (2000) 113.
- 9) 日本機械学会機素潤滑設計部門: 歯車の高精度・高効率加工と運転性能に関する調査研究分科会研究成果報告書, (2001) 54.
- 10) 竹山秀彦: 切削加工, 丸善, (1982) 31.