ホブ切り過渡現象の観察と切りくず生成機構の解明*

(第1報, 切りくず形状および切りくず飛散に関する基礎研究)

梅 崎 洋 二^{*1}, 有 浦 泰 常^{*1}
松 本 純 樹^{*2}, 木 村 大 二 郎^{*3}

Transient Phenomenon of Chip Generation and Its Movement in Hobbing (1st Report, Fundamental Research on the Chip Geometry and Chip Flight)

Yoji UMEZAKI^{*4}, Yasutsune ARIURA,
Hiroki MATSUMOTO and Daijiro KIMURA

^{*4} Department of Intelligent Machinery and Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University,
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 812-8581 Japan

The chip behavior that means the sticking to the cutting edge, the movements after cut, the flying directions and so on influences tool wear and surface finish quality in dry hobbing. The transient phenomenon of chip generation and behavior in milling with flytool are investigated by using high-speed video camera. Three typical chip generations, which are grouped in chip's curvature and flight ways, are observed in milling tests by the cutting edge of helix angle 0°. The chip's flight course changes by the tool tip materials into higher or lower flights. The phenomenon that the chip sticks to the rake face and it connects to the chip produced newly by pressure during next cutting is also observed. Chips stick easily to the rake face of cemented carbide tools. Under the conditions of lower cutting speeds less than 200 m/min and low hardness materials such as annealed or normalized low carbon steels, chips also stick easily to the rake face. The chip changes flight course by the location of ending point of cut on the fly tool.

Key Words : Gear, Chip, Milling, Cutting Tool, Hobbing, Chip Formation, High-Speed Camera

1. 緒 言

近年, 切削加工を取り巻く環境は, 高速切削・高送り化の高能率化だけでなく, 作業環境の安全化も厳しく追及されている。歯車のホブ切り加工においても切削油を用いないドライ切削が実行されつつある。しかし, ドライかつ高速切削が行われることにより, 切りくずの生成や排出時の挙動がホブの摩耗⁽¹⁾や創成歯面の性状に影響を及ぼすことが言及されている。歯車のホブ切りは, 工具と被削材が創成運動を行うこと, それぞれの切れ刃が断続切削かつ切れ刃上の位置や回転に伴って切り取り状態が変化することなどにより, その切削過程は複雑である。ホブの一刃に着目すると, 切れ刃の位置によって上向き, 下向き削りが混在しており, 切れ刃の摩耗や仕上げ面粗さの生成機構は解明されていない点が多い。ホブ切りを含めた切削工学にお

いて, 切削現象そのものを直接捉える研究は1960～1970年代に2次元切削現象を高速度カメラで捉えた研究⁽²⁾が国内外でなされたが, 現在はほとんど行われていない。

本研究ではドライ切削におけるホブ切りを想定した断続切削での切りくず生成や切りくず流出時の挙動の過渡現象を高速度ビデオカメラにより逐次に凍結し, 詳細な観察を行うことにより摩耗や切削歯面の生成機構に関連した諸現象の解明を目的としている。

2. 高速度ビデオカメラ測定システム

高速度ビデオカメラシステムを用い, 肉眼やビデオカメラでは捉えることのできない切削過渡現象の観測を行うためのシステムの構築を行った。本撮影システムは, カメラヘッド, カメラ制御部, モニタディスプレイ, コントローラ (PC/AT互換機) そしてソフトウェアの5つで構成される。システムの中核を担う高速度ビデオカメラは, CCDを使用した半導体メモリ記録型のハイスピードビデオであり, PC上にデジタル画像データとして保存できることが大きな特徴である。実験

* 原稿受付 2002年3月11日。

^{*1} 正員, 九州大学大学院知能機械システム部門(☎812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)。

^{*2} 正員, 富士重工業(株)(☎320-0834 宇都宮市陽南1-1-11)。

^{*3} 正員, 三菱電機ホイス(株)(☎819-0192 福岡市西区今宿東1-1-1)。

E-mail: umezaki@mech.kyushu-u.ac.jp

Fig.1 Measuring system of high-speed video camera

Table 1 Specification of system

High speed Video	Redlake Motion Scope PCI
Controller	PC/AT (Pentium II 333MHz)
Resolution	480x420 ~ 68x70pixels, 8bit
Frame rates	60 ~ 8000 frames / s
Exposure	1 / 60 ~ 1 / 80000s

状況の一例を図1に、仕様を表1に示す。なお、取り入れた連続画像は1コマごとに静止画像に変換し、必要部分を一覧画像に編集した。さらに画像処理および番号付加などを行い、出力した。

3. 断続切削における切りくず形状と切りくず流出過渡現象の関係

3.1 試験方法および条件 平刃形状の1本刃の舞いツールを用いて、フライス盤上にてホブ1刃（モジュール3）の刃先部の切取り厚さ・長さで切削速度

Table 2 Flytool materials⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

Grade	Thermal conductivity [W/mK]
Cermet HTP20	25~33
Cubic Boron Nitride BN	44
Cemented carbide HWP30	49
Cemented carbide HWM10	50~59

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed [m/min]	85, 140, 260
Feed [mm/rev]	1.0
Depth of cut [mm]	2.0

などのホブ切り条件に合わせた断続切削（ドライ・上向き切削）を行った。工具材は、超硬、サーメット、CBNであり、一部で高速度鋼を用いた。被削材は、歯車材として一般的なクロモリブデン鋼SCM415の焼きならし材およびSCM435 焼入れ焼戻し材であり、切削幅4mmの薄板を用いた。表2に工具材の種類、熱伝導率を、表3に切削条件を示す。なお、撮影条件は4000コマ/秒、1/8000秒の露出時間である。

3.2 試験結果と考察 図2に切りくず形状を示す。切削速度の増加により、また被削材が硬いほど切りくずが長くなり、厚さが薄くなっている。工具材の熱伝導率との関係では、熱伝導率が高いほど切りくずが短く、厚くなる傾向が現れている。熱伝導率の高い工具ほど切りくず温度が高くなり⁽⁹⁾、せん断変形が大きくなったと考えられる。熱伝導率の高い工具ほど刃先温度は下がると考えられるが、新井⁽⁹⁾らは、すくい面温度が低いと摩擦角が増え、せん断角が小さくなり総

Workpiece	SCM415N (HB160)			SCM435QT (HB340)		
Cutting speed	85m/min	140m/min	260m/min	85m/min	140m/min	260m/min
HTP20						
BN						
HWP30						
HWM10						

Fig.2 Shape of chips under various conditions

発熱量が増大するためであると説明しており、本試験のドライ切削でも同様な状況になり、切りくずの熱の除去量が大きくなり切りくず温度が高くなったと考えている。また図2中には以下に示す切りくず流出様式を記している。

図3～図5に切りくずの流出過渡状況を示す。大別すると3様式が観察できた。

・様式Ⅰ：切りくずの曲率は小さく、切り終わり直後

Fig.3 SCM415N, HTP20, 140 m/min (Type I)

Fig.4 SCM435QT, HTP20, 85 m/min (Type II)

Fig.5 SCM435QT, HWM10, 140 m/min (Type III)

に先端部が被削材に接触し、反発して飛散する。SCM415材の低速切削時に多い。

・様式Ⅱ：切りくずは大きく曲がりながら生成する。カールした先端部が被削材に接触し、しばらくこすりながら流出し、切削終了時に反発して飛散する。切りくずがカールする場合は多くがこの様式である。

・様式Ⅲ：切りくずは様式Ⅱとほぼ同様に流出する。切り終わり直後は切れ刃に付着しており、そのまま工具が少し回転した後飛散する。SCM435材の超硬工具での切削で観察された。

使用した舞いツールでは多くの場合、切削直後に切りくずは飛散した。しかし、一部で切りくずが切れ刃に付着し、次回にそのまま被削材に接触した。この現象は、切れ刃や仕上げ面に何らかの影響を及ぼすと考えられたので、高速度鋼製工具を用い、切れ刃に付着した切りくずの切削前後の挙動を調べた。

図6は、高速度鋼舞いツールを用いた乾式切削での切削前後の様子を示す。図6-1は、すでに切れ刃に付着したSCM435材の曲率の大きい切りくずが、被削材と衝突すると同時に切れ刃から離脱して飛散する状況が見られた。この場合は切れ刃にも仕上げ面にも何ら影響はないようである。

図6-2、図6-3では、SCM415材の小さい曲率の切りくずが付着した場合の一連の切削状況を示す。図6-2の切削直前の様子では、切れ刃に付着した切りくずは全く離脱する様子はなく、さらに図6-3に示すように切削が進行すると新しく生成された切りくずが付着している切りくずの下(すくい面側)に滑り込み、押し出している。この場合、切削速度を62m/minから85m/minに増加すると図6-4に示すように付着した切りくずに新しく生成された切りくずが付着し、一体となって流出した。

図7は、図6-4中の切りくず付着部分の断面の顕微鏡

Fig.6-1 SCM435, HSS, 62 m/min

Fig.6-2 SCM415, HSS, 62 m/min (Before cutting: 1~5 frames)

Fig.6-3 SCM415, HSS, 62 m/min (During cutting)

Fig.6-4 SCM415, HSS, 85 m/min (During cutting)

写真である。金属組織はパーライト部分とフェライト部分が明瞭に層状に分離しており、母材組織が圧縮された状態を示し、高温での溶着でなく、圧着状態であることが分かった。

切削直後に切りくずが切れ刃に付着し、そのまま次の切削に移る現象は、高速度鋼工具や超硬工具の場合に多く観察された。切削条件にも左右されるが、切削速度が200 m/min程度まではSCM415焼きならし材の

Fig. 7 Microscope photograph of attached portion

場合では超硬工具でも約90%程度の付着率が観察された例(400 m/minでは0%)もあり、現状の超硬ホブ切りの切削速度(200 m/min~350 m/min)を考慮すると、切りくずのかみ込み現象が起こり得ると推察できる。

4. 切りくず飛散経路

断続切削時の切りくずの飛散形態を詳細に観察し、仕上げ面および工具への損傷に及ぼす影響を検討した。

ホブ切りにおける切りくずは、切れ刃の側面部・丸み部・外周部からそれぞれ生成されるため複雑な形状となる。そこで、ホブ切りの側刃を近似させた平刃舞いツール切削試験と、ホブ切りの1刃をシミュレートしたホブ刃形舞いツール切削試験を行い、それぞれ切りくずの飛散経路を観察した。なお、撮影条件は1000コマ/秒、1/2000秒の露出時間である。解析ソフト上で切りくずを4~8倍に拡大して切りくずの中心を探し、その座標の時間変化を飛散曲線とした。

4.1 平刃舞いツールを用いた切削実験 図8上の座標は、図9に示すように横(X)軸が被削材の表面(上面)、縦(Y)軸が被削材上面に垂直の位置である。なお、1回の撮影で複数の切りくず飛散が見られたので、図8には複数の切りくず飛散経路の平均経路を示している。

図8に被削材熱処理別の切りくず飛散経路(曲線)を示す。被削材の熱処理状態、切削状態が同一である場合、超硬とサーメットを比較すると、超硬による切りくずがより高く飛ぶ傾向がある。また、サーメットでは熱処理状態が変わっても飛散経路に大きな変化はないが、超硬では焼入れ材で特に高い飛散経路を描いた。この場合は切りくずの付着も頻繁に起こっていることから、付着のし易さ(工具と被削材料との親和性が高い)が飛散経路に関係し、付着し易い程より高く飛ぶものと考えられる。

Fig.8 Chip's flight course by flytool cutting on horizontal milling machine

4.2 ホブ刃形舞いツールを用いた切削実験 1
 本のホブ切れ刃と同形状の舞いツールを用い、断続切削における3次元切削状態での切りくずの流出、飛散の様子を観察した。切りくずの挙動を調べるためにマシニングセンタの主軸正面、側面の2方向から測定した。

図10に撮影の様子と座標を示す。被削材を垂直に固定したので被削材表面がY軸(図9のX軸)、表面に垂直にX軸(図9のY軸)となる。被削材は焼きならしSCM415鋼材(幅43 mm、長さ112 mm)を用いた。撮影時のハレーションを防ぐために、つや消し黒塗装あるいはつ

Fig.9 The X-Y axis of co-ordinates

や消し黒テープを貼付した。

表4に実験条件, 工具材を示す。切削条件は, モジュール3, 歯数42枚の平歯車, 送り1.5 mmのホブ切り(ホブ諸元: 外径80 mm, 切れ刃みぞ数12, 条数1)を想定して, 最も切削量の大きい切れ刃の1回転あたりの切削体積(約5 mm³)に合わせた。なお, 切削体積を設定するためと実際のホブ切れ刃の切込み量に近付けるために被削材に前もって下溝を加工し, 大きな切れ刃刃たけ作用域が取れるように設定した。

図11に舞いツールによる切削状態を示す。下溝切削時の切れ刃中心に対してオフセット量を0とすれば, 左右対称の切削になり, オフセットを与えれば左右切

Fig.11 Cutting of flytool

れ刃のいずれかの切削量が増え, 切りくずは左右非対称の形状となり, 飛散状況も変化すると思われる。また, 被削材上面に傾斜角を付けても同様な状況になるのでオフセットかつ傾斜角を付けた切削の場合について実験を行った。

図12に舞いツールによる切削状態の解析例を示す。本解析法はホブ切り機構の数値解析法⁷⁾の応用である。1~41の横座表数値は, 切れ刃の分割番号を示す。21番が切れ刃の中心位置であり, 1, 41番が左右切れ刃の刃元部(ホブ切れ刃の標準刃たけの位置と同じ)の位置である。縦座標は, 切れ刃の回転角度を示し, 切れ刃が最も深く切込む位置が0であり, 切込む前を負角で, 後を正角で表わす。図中の数字は切れ刃分割点の各回転角の切り取り厚さをμmで示す。

図13に被削材に20°の傾斜角と0.2 mmのオフセット量を付けた場合の上向きおよび下向き切削における切りくずの飛散経路を丸印(高速度写真の各コマの切りくず位置)で, 平均の曲線を実線で示し, 以下に考察する。図14, 図15は確認試験で, 被削材を水平位置に置き(傾斜角0°, オフセット0.2mmとした。この場合, 図12の上向き, 下向き削りとほぼ同様な切削状態になる), 切りくずの流出状態を詳細に観察したもので考察に用いた。試験条件は全く同じである。

(1)上向き削りにおいては, 傾斜およびオフセットを付加すると, 被削材から真下方向に(-Y軸方向)に飛散する切りくずは少なくなり, 側面方向(±Z軸方向)に飛散曲線が偏向している。これは, 図14に示すように切削終了時の切れ刃すくい面上の切りくず離脱点を支点に回転モーメントが働き, 図13では側面の-Z方向に切りくずは運動するものと考えられる。サーメットに比べ超硬工具は切りくずと付着しやすく, 回転モーメントがより長い時間作用するために工具における切りくず飛散経路が側面方向(-Z)により大きく偏向していると思われる。

Fig.10 Coordinates of machining center

Table 4 Cutting conditions

Cutting speed	260 m/min
Feed	1.0 mm/rev
Pre-depth of cut	2.27 mm
Full depth of cut	3.5 mm
Tools	Cemented carbide HWP30
	Cermet HTP20

Fig. 12 Examples of calculation of undeformed chip thickness with a hob-tooth type flytool

(2)下向き削りにおいては、切りくずは上向き削りのように側面の-Z方向に運動する傾向はなかった。図15に示すように上向き削りの場合と同様に切りくずは離脱点を支点に回転しているように見えたが、離脱点が刃先中央側にあり、また下向き削りの場合、切削溝の深い部分で切削が終了するため切りくずが溝部の壁に衝突することにより逆に跳ね返る現象が見られ、結果として+Z方向の側面への飛行が多い。

5. 結 論

切れ刃の回転運動方向へ飛ぶ切りくずは、切りくず飛散に障害物がないのでかみ込みなどの現象を起こすことはない。一方、実際の歯車の切削を考えた場合、切削で生成される切りくずがその歯みぞ内で干渉してかみ込みの原因となるのか、切れ刃に付着後、次の歯みぞ内で問題となるかは明らかではないが、本研究で断続切削中の過渡現象を凍結しながら観察した結果においては、切れ刃に付着したままの切りくずと次の切削で生成される切りくずとの干渉により工具の摩耗、欠損や仕上げ面の性状に何らかの影響を及ぼすことが考えられる。

断続切削において、超硬合金は高速度鋼に比べ切りくずの付着は少ないが、サーメットに対比すると付着

Fig. 14 Flytool test of up cut (Cermet HTP20)

Fig. 15 Flytool test of down cut (Cermet HTP20)

Fig.13 Flight curves of chips with hob tooth type-flytool in up and down cuts
(Under the condition of inclination angle of 20 degree and 0.2 mm offset)

割合は高いことが分かった。工具損傷や仕上げ面性状への悪影響があることが示唆されるので、特にドライカットにおいては留意すべきである。

また、切りくずの形状やすくい面上の切削終了点の位置は、飛散状況に大きく影響を与えるので、さらに厳密にホブ切りとの切りくず形状の近似を目指したシミュレーションを行う必要がある。

参考文献

- (1) 朝倉, 青山, 朝倉, 福田, 超硬ホブによる量産歯車の高能率歯切り技術, 日本機械学会論文集 44 巻 388 号(1998-12) 4359-4368
- (2) 例えば, 切削機構に関する研究(第2報) 中山 一雄 精密機械 Vol.23, No.11, (1957), 528

- (3) 新井, 切りくず処理の基礎と応用, 日刊工業新聞, 39
- (4) Jawahir, I.S., van Luttervelt, C.A., 1993, Recent Developments in Chip Control Research and Applications, Annals of the CIRP, 42(2): 659-693
- (5) A.K.Balaji, G.Sreeram, I.S.Jawahir, E.Lenz, 1999, The Effect of Cutting Tool Thermal Conductivity on Tool-Chip Contact Length and Cyclic Chip Formation in Machining with Grooved Tools, Annals of the CIRP, 48(1): 33-38
- (6) Y.Kevin, Chou, Chris J.Evans, 1999, Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting, Wear 225-229 (1999) 234-245
- (7) 寺島, 上野, ホブの歯みぞ切削状態の数値解析, 日本機械学会論文集 43 巻 373 号 (1977) 3535-3547