切りくずのかみこみ解析のためのホブ切削機構のシミュレーション*

角 昌興^{*1}, 久保愛三^{*1}, 小森雅晴^{*1}Hob Cutting Simulation for Analysis of Chip Crush
between Cutting Edge of Hob and Tooth Flank of GearMasaaki SUMI^{*2}, Aizoh KUBO and Masaharu KOMORI^{*2} Department of Precision Engineering, Kyoto University,
Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8501 Japan

There are great advantages in dry hobbing not only for friendliness on the environment, but also for increasing processing speed, productivity and for decreasing manufacturing cost. Dry hobbing, however, often causes failures of cutting edge of hob or problems about the surface quality of tooth flank of manufactured gear, which have not been of problem in case of hobbing with cutting oil. Pinching and crushing of generated chips between cutting edge of hob and tooth flank is considered to be a major cause for those problems. In this report, a simulation method of trace of each cutting edge of hob relative to gear blank is developed. This simulation makes it possible to calculate the clearance between cutting edge of hob and tooth flank of gear blank. The thickness and form of generated chip and its movement on rake surface of hob tooth can be clarified. This achieves easy understanding of those values during hobbing process. Probability of pinching of chips between cutting edges of hob and tooth flank can be evaluated by position and width of clearance, chip thickness and direction of chip movement, which contributes to successful dry hobbing.

Key Words: Gear, Cutting, Chip, Hobbing, Dry Cutting, Chipping, Tool Failure, Clearance, Simulation

1. 緒 言

切削加工分野では、環境問題や切削油管理の点で、ドライカットが注目をあびている。歯車のホブ切りにおいても、高速切削が可能となり、ホブ切り単価の大幅な削減につながることから、超硬ホブやハイスホブを使ったドライカットへの移行が進んでいる⁽¹⁾⁻⁽²⁾。

しかし、ドライホブ切りにおいては、切削油を用いた従来の加工法では顕著に現れなかった、切りくずのかみこみが原因と考えられるホブ損傷や歯面不良（歯面むしれ、歯面キズ、切りくず圧着など）が頻繁に発生し、製品不良の大きな問題となっている。ホブ切れ刃と被削歯車歯面との隙間への切りくずのかみこみには、①切削中の切りくずがかみこむ場合、②切削の終わった切りくずが飛散してかみこむ場合、③切削の終わった切りくずが切れ刃に溶着し、ホブが1回転した後の切削時にかみこ

む場合がある⁽³⁾。②、③については、エアブローを設置したり、コーティングやホブ材種をうまく選定することで発生を防止することがある程度可能になりつつあるが、①については、ホブ切削機構の複雑さなどのため現象が十分に解明されておらず、有効な対策は明らかにはなっていない。本研究は、切削中に発生する切りくずがホブ切れ刃と被削歯面との間にかみこまれて、ホブ損傷や被削歯車の歯面不良をひきおこす機構を解明し、これら問題を解決せんとするものである。

2. ドライホブ切り状態の観察

図1は、モジュール2.75、圧力角20°、歯数62、ねじれ角30°、転位係数-0.6の右ねじれはすば歯車を、外径100mmの右ねじれ4条超硬ホブを使用して、送り2.5mm/revでクライム切削したときに発生したホブ切れ刃のチップングを示す。図2はこの時に採集した切りくずを形状別に分類した結果であり、明確に数種類の形状に分類できることがわかる。このことは、これら切りくずがある定常的な状態で形づくられる必然的な機構の存在を暗示している。

* 原稿受付 2002年8月7日。

^{*1} 正員, 京都大学大学院工学研究科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)。

E-mail: shiga-sumi@muc.biglobe.ne.jp

Fig.1 Chipping of cutting edge of carbide hob under dry cutting

Fig.2 Classification of dry hobbed chips and their form groups

切りくずの一部を図3に示す。(a),(b)いずれの図の切りくずも元々は右端の切りくずのように左右に繋がっていたが、取り扱いの途中で分離したため、分離後の片方だけを図の左側に示している。(a),(b)に示した切りくずはいずれも、およそ同じような形状をしているが、(a)の切りくずには大きな折れ曲がりと同じ箇所認められる。この折れ曲がりにはホブ切れ刃と歯みその間に、この切りくずが挟まれたことが原因と考えられるが、各切りくずの折れ曲がりの状態にほとんど違いが認められないことから、切れ刃から飛散した切りくずが偶然に押しつぶされたものではなく、切削中の切りくずが定常的機構として、強く押しつけられたものと考えられる。

図4は、他の切りくずの一例を示したものである。ほ

(a) Chips bent after the formation

(b) Same kind of chips as that of (a), but not bent after their formation

Fig.3 Bent or crushed chips observed under dry cutting

Fig.4 Cutting edge marks found on the same position of chips, observed under dry cutting

(a) Normal chips

(b) Sheared chips

Fig.5 Shearing of chips after their formation, found among dry cut chips (cf. right lower most small chip group in fig.2)

Fig.6 Chips observed on rake surface of hob tooth, supposed during cutting

ほ同じ形のこれら切りくずには、ホブ切れ刃によって同じ箇所にも明確な傷がつけられており、恐らく切削中の切りくずがホブの他の箇所の切れ刃と被削歯面の間にかみこまれ傷つけられたものと考えられる。

一般に、薄い切りくずは切削の始めの部分よりしだいに厚さを増し、ついで、切削終わり部分に近づくにつれて、しだいに厚さが減少していく形状となるが、発生後再びホブ切れ刃で切削、切断されたものは、異なる形状を示す。図5はこの状況の一例を示したものである。(a)は通常の切りくずで、生成後に再び切れ刃の当たった痕跡はないが、(b)には切断された断面が切りくず写真の右端に明確に認められる。切りくずの切断面は、テンパーカラーを持っていることから、発生後、極めて短時間の内にホブの他の箇所の切れ刃と被削歯面の間にかみ込まれて切断されたことが暗示されている。

図6は、切れ刃のすくい面に切りくずが付きやすい超硬ホブ材と歯車材を用いたドライカットテスト⁽⁴⁾⁽⁵⁾において、切削途中でホブと歯車を瞬時に離した後、ホブ切れ刃を観察した結果の一例を示している。切りくずがホブ切れ刃からすくい面にかけて付着しているのが認められるが、溶着した様子は見られなかったことから、切削中の切りくずのホブすくい面上の状態を示しているものと考えられ、緒言①の損傷発生の可能性が暗示されている。(a)のように切りくずが比較的大きい場合は、これが切れ刃と被削歯面の隙間にかみこまれると、切れ刃に大きな損傷を引き起こす可能性がある。より小さな(b)の切りくずの場合は、たとえホブの切れ刃にチップングを生じないとしても、隙間にかみこまれると仕上がった歯車歯面にこすり付けられ、歯面不良につながる。

これらの例に見てきたように、定常的な切削機構として切りくずが切れ刃と被削歯面との間にかみこまれる状況が存在するようである。図1のチップングはこの様な切りくずのかみこみにより、ホブ切れ刃のその部分に過大な力がかかり、発生したものと推測される。

このような、切りくずのかみこみに起因するホブ損傷や歯面不良を防止するためには、切削中の切りくずの大きさや形状、移動方向および切れ刃と被削歯面の隙間の状態を把握し、適切な対策を施す必要がある。本研究は、ホブの各切れ刃の切削軌跡を求めることで、切削中の切りくずの状態ならびに切れ刃と被削歯面の隙間の様子を解析し、切りくずのかみこみ易さを評価する手法の提案を行う。

3. 従来のホブ切削機構解析法の問題点

図7に示すように、創成中心となる切れ刃を0番刃と呼び、この切れ刃より先に歯車ブランクを切削する切れ刃を-2番刃、-1番刃、後に切削する切れ刃を1番刃、2番刃の順に呼ぶこととする。

ホブ切削機構の解析法は、寺島ら⁽⁶⁾、相浦ら⁽⁷⁾、上野ら⁽⁸⁾、日高ら⁽⁹⁾、梅崎ら⁽¹⁰⁾により報告されており、その手法が一般に用いられている。図8はこの手法による解析結果の一例であり⁽⁹⁾、ここでは、モジュール4、圧力角20°、歯数33の平歯車を、外径100mmの右ねじれ1条ホブを使用して、送り2mm/rev.でクライム切削する場合の-4番刃の切削状態を対象として取り上げている。縦軸の1から53の番号は、図9に示すように、歯みそ長手方向の位置を表すもので、歯みそを等間隔にスライスした番号を示しており、スライスの間隔は図8の右側に示すように0.9mmである。また、図8の縦軸に付されている角度は、歯みそ長手方向の各位置に相当するホブ切れ刃の代表点の回転角であり、ここでは、切れ刃面が最も深く切り込む位置での回転角を0°としている。図8の横軸はホブ切れ刃上の位置を示しており、43番が左切れ刃（すくい面を正面から見て左にある切れ刃）ホブ歯元部、27番と25番がホブ歯先部、9番が右切れ刃ホブ歯元部である。このホブ切れ刃上の点に付された番号と歯みそとの対応は図9に示す通りである。図8の曲線で囲まれた範囲は-4番刃が切削を行う領域を示しており、図中の数値は切削厚さを μm 単位

Fig.7 Definition of tooth number of hob

Fig.8 Simulation result by conventional calculation method for cutting thickness of No.-4 tooth of hob⁽⁹⁾

Fig.9 Definition of cut groove of gear blank as functions of revolution angle of hob, sliced number of gear blank in the cut groove, i.e. longitudinal tooth space, and the positional number of tooth profile

で示したものである。なお、図8の上方の図は、切れ刃摩耗のスケッチである。

この解析法による計算結果は、従来、図8の表現法で示されているが、この方法では切取り厚さの評価は可能であるものの、切れ刃と被削歯面の隙間を把握することはできないため、切りくずかみこみ易さを評価することは難しい。また、切取り厚さは数値で示されているだけであるため、切りくずの様子を直観的に理解するのは容易でない。

Fig.10 Definition of a point on the cutting edge of hob tooth expressed on the hob-coordinates and gear-coordinates

4. 切りくずおよび切れ刃と歯面の隙間の計算法

4・1 計算の基礎 図10に、右ねじれ歯車を右ねじれホブのコンベンショナル送りでホブ切りする状態を示す。図では、歯車が手前、ホブが紙面奥に位置している。0番刃の切れ刃中心およびホブ切れ刃上の任意の点Pからホブ軸に垂線を下ろした交点を、それぞれ点O_h、点P_hとする。ここでは、0番刃のホブ中心O_hが、ちょうど歯車端面と同じ高さにある状態を図示している。また、点Pと点P_hを結ぶ直線が歯車軸直角断面と平行となる場合を0として、点Pの回転角φを定義する。この場合、ホブ切れ刃上の点Pは、0番刃のホブ中心位置点である点O_hから点P_hまでのホブ軸方向距離k、半径r、回転角φを用いて表すことができる。

ここで、歯車端面と歯車軸の交点に原点をもつ歯車座標系{X, Y, Z}を設定する。歯車軸上にZ軸、点O_hが送りに伴って描く直線軌跡へ降ろした垂線をY軸にとり、X軸はこれら2軸と垂直となるようにとる。ホブの座標系で表現されたホブ切れ刃上の点(k, r, φ)は、次の式により歯車座標系に変換できる⁽⁷⁾⁻⁽⁸⁾。

$$x = k \cos \Gamma - r \sin \phi \sin \Gamma \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$y = c - r \cos \phi \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$z = k \sin \Gamma + r \sin \phi \cos \Gamma \quad \dots \dots \dots (3)$$

Fig.11 Relationship between $\{X_s, Y_s, Z_s\}$ coordinates and $\{X, Y, Z\}$ coordinates

Γ はホブの取り付け角度であり、歯車軸直角面に対するホブ軸の傾きを示す。 c はホブ軸と歯車軸との中心距離である。ホブの回転、送りに伴う、このホブ切れ刃上の点の移動を追うことで、この点の空間に対する軌跡が得られる。

ここで、ホブ切れ刃上の点の、歯車に対する軌跡を求めるために、座標系 $\{X, Y, Z\}$ と同じ原点をもつ、歯車に固定された座標系 $\{X_s, Y_s, Z_s\}$ を定義する。すなわち、 Z_s 軸は Z 軸と同一であるが、図 11 に示すように、 X_s 軸、 Y_s 軸は歯車の回転により空間に対して回転する。 X 軸、 Y 軸と X_s 軸、 Y_s 軸は 0 番刃の切れ刃の中心点の回転角が 0 となる場合に一致するように定義すると、対象とする切れ刃上の点の回転角が ϕ となる場合には、歯車回転角 θ は次のように表される。

$$\theta = (\omega + \phi)R_r \quad (4)$$

ここで、 ω は 0 番刃の切れ刃の中心点からホブねじ筋に沿って対象とする切れ刃の中心点までのホブ回転角であり、 R_r は歯車とホブの回転比である。この歯車回転角 θ を用いると、座標系 $\{X, Y, Z\}$ で表された点は次の式で座標系 $\{X_s, Y_s, Z_s\}$ 上の表現に変換できる。

$$x_s = x \cos \theta - y \sin \theta \quad (5)$$

$$y_s = x \sin \theta + y \cos \theta \quad (6)$$

$$z_s = z \quad (7)$$

これにより、歯車に対するホブ切れ刃上の点の軌跡を求めることができる。

4・2 計算手順 ホブのすくい面と切れ刃を図 12

Fig.12 Profile and calculation point on cutting edge of hob tooth

Fig.13 Flowchart for calculating the trace of hob cutting edges

に示す。図のように、切れ刃形状、すなわち、歯先部、左右の角丸み部、側面切れ刃部の形状を点列(ここでは 43 点)で表現することとし、これらの点の軌跡の集合によって、ホブ切れ刃の軌跡を形成する。こぶ付きホブも同様に取り扱うこととする。

図 13 にホブ切れ刃軌跡面の計算手順を示す。まず、①で歯車諸元、ホブ諸元、歯切り条件を入力し、②でホブと歯車の中心距離、ホブ取り付け角などのホブ切り基本設定値を求め、さらに、切削にあずかるホブ切れ刃の範

図, ホブ1回転で切削される歯車軸方向の範囲を求める。次に③で, 対象とする切削段階前に形成される歯みぞ形状, すなわち, 歯車1回転前における切削が終了した段階での歯みぞ形状を求める。これは, 歯車1回転前における切削において作用する全ての切れ刃が通過した後の形状であるので, 各作用切れ刃の軌跡の中でも歯みぞの最も深い位置となる軌跡の集合を求めることで得られる。この歯車1回転前の歯みぞ形状は, どの切れ刃についても同一のものである。次に1つの切れ刃を対象として取り上げ, まず, その切れ刃の1つ前の切れ刃についての軌跡を求める(⑤)。ついで, ⑥で対象とする切れ刃について同様の計算を行う。この手順を各切れ刃に対して繰り返すことで(⑧), 各切れ刃の歯車に対する軌跡を求めることができる。

5. 切りくずのかみこみ易さの評価法

表1(a)の諸元をもつ歯車を, (b)の諸元をもつホブで, (c)の条件下で加工する場合を取り上げる。この諸元で, 中心距離は98.975mm, ホブ取り付け角は16.23°であり, 作用切れ刃の範囲は-26番刃から10番刃まで, ホブ1回転で切削される歯車軸方向の範囲は28mmとなる⁽⁷⁾。

図14(a), (b)はそれぞれ z_s 座標が18mm, 15mmの位置の歯車軸直角断面スライスにおけるホブ切れ刃軌跡の断面の計算結果の一例である。厳密に隙間の大きさを求めるためには, ホブ切れ刃のすくい面断面で考える必要がある

Table 1 Sample specification of gear and hob and cutting condition

(a) Specification of gear

Module	2.5
Pressure angle	20°
Number of teeth	45
Helix angle	20° RH
Cutting depth	5.875mm
Addendum modification factor	0
Outside diameter	124.70mm

(b) Specification of hob

Outside diameter	85mm
Number of threads	2RH
Lead angle	3° 46'
Number of gashes	16
Amount of protuberance	0.05mm
Radius of top corner	0.85mm

(c) Cutting condition

Feed of table revolution	4mm/rev.
Direction of feed	Climb
Hob set angle	16.23°

るが, 切りくずかみこみの可能性を評価するという本論文の目的から考えると, 歯車軸直角断面での隙間の解析結果でも問題ないものと判断し, 歯車軸直角断面で取り扱うこととする。破線は歯車1回転前の軌跡, 太線はホブ-22番刃の軌跡, 細実線は-22番刃の直前に作用する切れ刃である-23番刃の軌跡を示す。-22番刃の軌跡が1つの歯車軸直角断面上で他の軌跡よりも深く位置している箇所では, -23番刃または歯車1回転前の軌跡との間の領域(塗りつぶした部分)が, -22番刃により切削されることを意味している。逆に, -22番刃の軌跡が-23番刃また

(a) 2 dimensional view at $z_s = 18\text{mm}$

(b) 2 dimensional view at $z_s = 15\text{mm}$

Fig. 14 Expression of cutting area and clearance between gear blank and the cutting edge of No.-22 tooth of hob

(a) View of gear and hob tooth (b) Section A-A

Fig. 15 Definition of slices normal to gear axis

は1回転前の軌跡より浅い場合、すなわち、図中で他の線より下側となっている斜線部分では切削されておらず、すでにある歯みぞと切れ刃の間に隙間が発生していることとなる。図(a),(b)を比較すると、 z_s が大きい位置では歯みぞ全体が削られているが、 z_s が小さい位置では左側の領域、すなわち、ホブの左切れ刃が作用する領域だけが削られており、右側の領域や歯溝中央では大きく隙間が開いていることがわかる。

図15(a)は、ホブでギヤブランクがクライムカットで切削される状態を模式的に、下側から見たとして示したものである。ホブの0番刃がギヤブランク中心線上の裏側に位置しているとすると、-22番刃も同じ裏側で、0番刃と-22番刃のホブ軸方向距離に相当する分、中心線から離れた所に位置していることになる。ここでは、図15(b)に示すような、1mm間隔で位置する歯車軸直角断面ごとにホブ切れ刃の軌跡を示すことにする。

図16は、図15(a)と同じ視点から歯車全体を見て、荒削り部である-22番刃の軌跡をシミュレートした結果を示したものである。すなわち、図16は、図15(a)の視点から見て裏側にある歯みぞを、やや下方より観察していることとなる。被加工物がはすば歯車であるため、実際は、各歯車軸直角断面上の歯みぞ位置は円周方向にずれるのであるが、ここでは、解析結果の理解を容易にするため、図15(a)、図16ともに各歯車軸直角断面上の歯みぞ中心位置が一致するように配置して示している。図16の右上がりの直線（実際はわずかな曲線）は、歯車軸直角断面での歯先円周であり、縦線は-22番刃の切れ刃上の各計算点の軌跡を意味している。また、細い破線は歯車の1回転前の歯みぞ軌跡を、細線は-23番刃の切れ刃軌跡を、太線は-22番刃の切れ刃軌跡を示す。

ここで、太い破線は、ある瞬間のホブ切れ刃の位置、すなわち、同時切削線を表しており、A、B、C、Dの順に移動する。ホブ軸は歯車軸に直交する状態に対して取り付け角 Γ だけ傾いているため、ある瞬間の切れ刃の位置は全体的に右上がりとなる。このため、どの歯車軸直角断面でも、右切れ刃よりも左切れ刃のほうが先に通過することとなる。同時切削線Bは、右切れ刃の切削終わり段階のものであり、同時切削線Dは左切れ刃の切削終わり段階のものである。これらの同時切削線の歯車軸方向の隔たりは3.6mmであり、これに相当する時間は、左切れ刃のみが切削していることを意味している。

ホブのすくい面上での切りくずの移動方向は、切れ刃のどの位置で歯みぞが切削されているかによって決まると考えられる。図17は、切れ刃が図16のA、B、Cの位置となる時のホブすくい面上での切りくずの移動の様

Fig.16 Expression of cutting area and clearance between gear blank and cutting edge of No.22 tooth of hob (3 dimensional view)
DSEC : Distance of single edge cutting

Fig.17 Difference of direction of chip flow on rake surface of hob tooth at each cutting stage

子を、シミュレーション結果に基づき模式的に推定したものである⁽¹¹⁾。この切りくずの生成が始まった直後、(a)の段階では、歯みぞ全体が切削されているため、切りくずの流れはホブ歯元方向に向かう。切削が進んだ(b)の段階では、右切れ刃の切削が終わり、ホブ外周切れ刃と左切れ刃の切削となるため、切りくずの流れは若干右切れ刃の方向となる。さらに切削が進んだ(c)の段階では、左切れ刃の一部のみの切削となり、(b)から(c)までに生成し

た細く長い切りくずに、繋がった大きな切りくずは、右切れ刃の方向へ移動することとなる。

一方、(c)の段階では、右側に切れ刃と歯面の隙間が大きく現われている。このため、切りくずはこの隙間に向かって流れ込むこととなり、隙間に入り込む可能性があることがわかる。この場合、切りくずの大きさ、厚みに対して隙間が十分に大きければ、切りくずは隙間を通り抜けるだけだが、そうでない場合は、切りくずが隙間に挟まれることになる。そして、切りくずが厚ければ、ホブ切れ刃の一部に大きな力がかかることとなり、ホブ損傷につながり、切りくずが薄ければ、歯車歯面に切りくずの一部がこすりつけられる不具合となる。

このように、提案したホブ切削機構解析法で得られる結果をグラフィックに理解することにより、切りくずのホブ切れ刃と被削歯面の隙間へのかみこみの可能性を評価することができる。また、図14(a)および(b)の2次元表示を利用すれば、歯車軸直角断面における、切り取り厚さ、隙間の大きさの寸法を正確に把握できるため、切りくずかみこみの可能性をより評価しやすい。実際の加工結果とそれに対応するシミュレーション結果を比較することで、切りくずかみこみによるホブ損傷、被加工歯面性状の不具合についても予測できると考えられる。

6. 結 言

歯車のドライホブ切りでは、切削中の切りくずのかみこみが原因と考えられるホブ損傷や歯車歯面不良が問題となっている。本研究では、被削歯車に対するホブの各切れ刃の軌跡を求める手法を開発し、次の成果を得た。

(1) 切削中に発生する、切れ刃と歯車歯面の隙間の位置と形状、大きさをシミュレート可能とした。

(2) 切りくずの発生状態を2次元、3次元的に表現し、切りくずの厚み、形状を直観的に捉えることを可能にした。また、同時に作用する切れ刃上の領域を求めることで、すくい面上での切りくずの移動方向を推測することが可能となった。

(3) 切りくずの大きさや厚さと流れの方向、その方向に現われる切れ刃と歯車歯面の隙間の大きさ、およびその時間的変化の状態を評価することで、切りくずが隙間に入り込む可能性があるかを判定、評価することを可能とした。

このシミュレーションは、切りくずのかみこみによるホブ損傷、あるいは、仕上がり歯面の不具合の発生の可能性の評価、および、これら問題の発生した時の原因究明と対策の決定を可能とするものである。

文 献

- (1) 桜木・小林・袴田・川田・角・米倉, 自動車用歯車の超硬ホブ切りに関する研究, 機論, 67-655, C(2001), 811-816.
- (2) 「ホブによるドライカット」調査研究報告書, 日本歯車工業会, 2000.
- (3) 桜木・越智・川田・西岡・米倉・津村, 高速ドライホブ切りにおける切りくずの歯面噛み込み対策, 機講論, No.01-1, (2001), 147-148.
- (4) 桜木・米倉・角・津村・小松, 超硬ホブ切りを目指した歯車材の被削性の基礎的評価, 機講論, No.00-1, (2000), 417-418.
- (5) 桜木・米倉・角, 超硬ホブ切りに関する切削性能の評価法, 機論, 67-660, C(2001), 2725-2731.
- (6) 寺島・上野, ホブの歯みそ切削状態の数値解析, 機論, 43-373, (1977-9), 3535-3547.
- (7) 相浦・米倉・永野, 高能率ホブ切りにおけるホブ切れ刃の削る切りくず形状, 不二越技報, VOL.38, No2, (1982), 1-16.
- (8) 上野・相浦, ホブ食付き部の形状について, 機講論, No.9, (1959-4), 15-20.
- (9) 日高・上野・寺島, ホブ切れ刃の摩耗に関する研究(かど摩耗の発生機構について), 機論, 45-389, C(1979), 129-133.
- (10) 梅崎・有浦・上野・井上, ホブかど摩耗発生機構に関する研究, 機論, 54-501, C(1988), 1140-1143.
- (11) 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, 機講論, No.98-1, (1998), 579-580.