ホブの作用すくい角に関する研究*

永野 喜三郎^{*1}, 米 倉 将 隆^{*1}, 杉 本 武 治^{*2}

Actual Rake Angle of Cutting Edge in Hobbing

Kisaburou NAGANO^{*3}, Masataka YONEKURA and Takezi SUGIMOTO

^{*3} Kurume National College of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Komorino-machi 1, Kurume City, Fukuoka Prefecture, 830 Japan

A rake angle of cutting tool has a more influence for tool wear and accuracy of finishing surface, value setting of a rake angle is very important. But on the other hand not enough theoretical study has given to this actual rake angle during hobbing operation. Here we would like to show the change of actual rake angle caused by hob, workpiece data and cutting conditions with theoretical calculation. As a result, we found a lead angle more influence for a actual rake angle, and there is large difference between the right and left side in finishing surface such as large module hob.

Key Words: Gear, Cutting, Hobbing, Actual Rake Angle, Hob Wear, Finishing Surface

1. 緒 言

切削工具のすくい角は、工具損傷や仕上精度に与える影響が大きく、その値をどの程度に設定するか非常に重要である。例えば、焼入歯車の加工精度向上を目的として、大きな負のすくい角をもつ超硬スカイピングホブが広く用いられ効果を発揮している⁽¹⁾。しかし、この超硬スカイピングホブも、実際にホブ切りしているときのすくい角(以後、作用すくい角と呼ぶ)は、まだ理論的に解明されていないのが実状である。

ゆえに本研究では、ホブと歯車の相対速度からホブ切れ刃の作用すくい角の解析を行い、ホブ・歯車および切削条件によって、それがどう変化するか計算した。さらに、作用すくい角が歯車の仕上げ面粗さに及ぼす影響についても検討を行った。

2. ホブ切れ刃の作用すくい角の解析

2・1 ホブ切れ刃の切削機構 図1はホブ切り機

構の説明図である。ホブ切りでは、ホブの回転、ホブの送り、歯車材の回転、この三つの運動によって歯車を創成する。ホブ軸と歯車軸との共通垂線がホブ軸と交わる点oを原点とし、図1のようにx軸、y軸、z軸を定める。いずれも矢印の方向を正とする。ホブ軸上の原点oよりホブ軸方向に $k(oa)$ の距離にある任意の切れ刃上の点 P_0 は、a点を中心に回転運動を行う。点 P_0 がa点を含むxy平面に平行な平面から、 ϕ 回転したときの位置 $P(x, y, z)$ は、

$$x = k \cos \Gamma - r_p \sin \phi \sin \Gamma \cdots \cdots (1)$$

$$y = C - r_p \cos \phi \cdots \cdots (2)$$

Fig.1 Hobbing mechanism

* 原稿受付 2000 年 4 月 5 日。
^{*1} 正員、久留米工業高等専門学校 (〒830-8555 久留米市小森野町 1-1)。
^{*2} 正員、久留米工業大学 (〒830-0052 久留米市上津向野 2228)。
E-mail: nagano@me.kurume-nct.ac.jp

$z = k \sin \Gamma + r_p \sin \phi \cos \Gamma$ (3)
 で表される⁽²⁾。ここで、 Γ はホブの取付角、半径 r_p は $r_p = aP$ 、 C はホブと歯車材の中心距離、である。

表1は右巻きホブを用いたときの k, Γ, ϕ の正負の取り方を示す。

2・2 作用すくい角の定義 図2は、図1の点 P における歯車に対するホブの相対速度 V を分解したもので、 V_a は切れ刃直角方向の速度成分、 V_b は切れ刃方向の速度成分、いずれもすくい面上(すくい角 $\xi_0 = 0^\circ$ の場合)にある。また、 V_c は V_a, V_b と直交する速度成分である。

相 対 速 度 $V_r = \sqrt{V_a^2 + V_b^2}$ と $V = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}$ のなす角度を $\Delta\xi$ とすると、

$$\Delta\xi = \tan^{-1}(V_c / \sqrt{V_a^2 + V_b^2}) \text{ (4)}$$

となる。

図3において、 V, V_r を含む平面内の角度 ξ を作用すくい角と定義すると、作用すくい角は図3から

$$\xi = \pm(90^\circ - \Delta\xi)$$

$$= \pm \tan^{-1}(\sqrt{V_a^2 + V_b^2} / V_c) \text{ (5)}$$

となる。作用すくい角は、 V_r がすくい面外にある時

は正となり、 V_r がすくい面内にある時は負となる。

図4は、 V_a, V_b および V_c の正負の取り方を示す。

2・3 作用すくい角の解析

歯車材の速度成分； P 点における歯車対の周速 v は

$$v = 2\pi \cdot R_p \cdot n_G \text{ (6)}$$

$$n_G = n_H \frac{Z_H}{Z_G} \left(1 \pm \frac{f \sin \beta}{\pi m Z_G}\right) \text{ (7)}$$

である。ただし式(7)の±は、ホブの巻き方向と歯車のねじれ方向が同じ同巻きホブ切りを正、ホブの巻き方向と歯車のねじれ方向が異なる逆巻きホブ切りを負とする。 R_p は、歯車軸から P 点までの距離で、 $R_p = \sqrt{x^2 + y^2}$ である。 x と y の値は式(1)、(2)より求める。また、 m はモジュールで、 n_H, Z_H, f はホブの回

Fig. 4 V_a, V_b, V_c

Table 1 k, Γ, ϕ (in case of right handed hob)

	Spur gear		R.H gear		L.H gear	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓
k	-	-	+	-	-	+
Γ	-	-	+	+	-	-
Φ	+	-	+	-	+	-

↓:Conventional hobbing ↑:Climb hobbing

Fig. 2 Component of relative velocity V

Fig. 3 Actual rake angle ξ

(a)

(b)

(c)

Fig. 5 Components of circumference velocity with gear blank

転数・条数・送り, n_G, Z_G, β は歯車の回転数・歯数・ねじれ角, である.

この周速 v を, まず図 5(a) のように x 軸方向成分と y 軸方向成分に分ける. 次に V_x を図 5(b) のように V_{x1} と V_{x2} に分ける. さらに V_{x1} と V_y を図 5(c) のように, ホブの半径方向成分 (V_{x1r}, V_{yr}) と回転方向成分 (V_{x1c}, V_{yc}) に分ける. それぞれの速度成分を, V_a, V_b, V_c 方向で整理すると, 図 6 を得る. ただし, 図 6 中の○印は紙面垂直方向成分を示す.

V_a, V_b, V_c 方向の速度成分 V_{ga}, V_{gb}, V_{gc} は,

(I) 左切れ刃の場合;

$$\begin{aligned}
 V_{ga} &= -V_{x1a} + V_{x2a} + V_{ya} \\
 &= v(-\cos \theta \sin \Gamma \sin \phi \sin \alpha \\
 &\quad + \cos \theta \cos \Gamma \cos \alpha + \sin \theta \cos \phi \sin \alpha) \quad \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{gb} &= V_{x1b} + V_{x2b} - V_{yb} \\
 &= v(\cos \theta \sin \Gamma \sin \phi \cos \alpha \\
 &\quad + \cos \theta \cos \Gamma \sin \alpha - \sin \theta \cos \phi \cos \alpha) \quad \dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{gc} &= -V_{x1c} - V_{yc} \\
 &= -v(\cos \theta \sin \Gamma \cos \phi + \sin \theta \sin \phi) \quad \dots\dots\dots (10)
 \end{aligned}$$

(II) 右切れ刃の場合;

$$\begin{aligned}
 V'_{ga} &= -V_{x1a} - V_{x2a} + V_{ya} \\
 &= v(-\cos \theta \sin \Gamma \sin \phi \sin \alpha \\
 &\quad - \cos \theta \cos \Gamma \cos \alpha + \sin \theta \cos \phi \sin \alpha) \quad \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V'_{gb} &= V_{x1b} - V_{x2b} - V_{yb} \\
 &= v(\cos \theta \sin \Gamma \sin \phi \cos \alpha \\
 &\quad - \cos \theta \cos \Gamma \sin \alpha - \sin \theta \cos \phi \cos \alpha) \quad \dots\dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

$$V'_{gc} = V_{gc} \quad \dots\dots\dots (10)'$$

となる. ただし, 右巻きホブの場合は $v > 0$, 左巻きホブの場合は $v < 0$, とする.

また, $\theta = \tan^{-1}(x/y)$ で, x, y の値は式 (1), (2) より求める.

Fig. 6 Components of circumference velocity with gear blank

ホブの速度成分; ホブ切れ刃上の点 P における送り速度 S を, 図 5 と同様に分解すると図 7 のようになる. これを V_a, V_b, V_c 方向で整理し, 図 8 を得る. ここで, V_{hp} は P 点におけるホブの周速である. 図 8 から, V_a, V_b, V_c 方向のホブの速度成分 V_{ha}, V_{hb}, V_{hc} は,

(I) 左切れ刃の場合;

$$\begin{aligned}
 V_{ha} &= S_{1a} + S_{2a} \\
 &= S(\cos \Gamma \sin \phi \sin \alpha + \sin \Gamma \cos \alpha) \quad \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{hb} &= -S_{1b} + S_{2b} \\
 &= S(-\cos \Gamma \sin \phi \sin \alpha + \sin \Gamma \cos \alpha) \quad \dots\dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{hc} &= S_{1c} + V_{hp} \\
 &= S \cos \Gamma \cos \phi + V_{hp} \quad \dots\dots\dots (15)
 \end{aligned}$$

(II) 右切れ刃の場合;

$$\begin{aligned}
 V'_{ha} &= S_{1a} - S_{2a} \\
 &= S(\cos \Gamma \sin \phi \sin \alpha - \sin \Gamma \cos \alpha) \quad \dots\dots\dots (16)
 \end{aligned}$$

$$V'_{hb} = -S_{1b} - S_{2b}$$

Fig. 7 Components of V_{hp} and S

Fig. 8 Components of V_{hp} and S

$$= -S(\cos \Gamma \sin \phi \sin \alpha + \sin \Gamma \cos \alpha) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$V'hc = Vhc \quad \dots\dots\dots (15)'$$

となる。ただし、コンペンショナルホブ切りの場合は $S > 0$ 、クライムホブ切りの場合は $S < 0$ 、とする。

以上の解析より、ホブ切れ刃の Va , Vb , Vc は、

$$\begin{aligned} Va &= Vha - Vga = S_{1a} + S_{2a} + V_{x1a} - V_{x2a} - V_{ya} \\ &= S(\cos \Gamma \sin \phi \sin \alpha \pm \sin \Gamma \cos \alpha) \\ &\quad - v(-\cos \theta \sin \Gamma \sin \phi \sin \alpha \\ &\quad \pm \cos \theta \cos \Gamma \cos \alpha + \sin \theta \cos \phi \sin \alpha) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\begin{aligned} Vb &= Vhb - Vgb \\ &= -S_{1b} + S_{2b} - V_{x1b} - V_{x2b} + V_{yb} \\ &= S(-\cos \Gamma \sin \phi \sin \alpha \pm \sin \Gamma \cos \alpha) \\ &\quad - v(\cos \theta \sin \Gamma \sin \phi \cos \alpha \\ &\quad \pm \cos \theta \cos \Gamma \sin \alpha - \sin \theta \cos \phi \cos \alpha) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\begin{aligned} Vc &= Vhc - Vgc = Vhp + S_{1c} + V_{x1c} + V_{yc} \\ &= Vhp + S \cos \Gamma \cos \phi \\ &\quad + v(\cos \theta \sin \Gamma \cos \phi + \sin \theta \sin \phi) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (20)$$

となる。ただし、式中の±は左切れ刃を正、右切れ刃を負、とする。送り S mm/min を f mm/rev. で表し、ホブの周速 Vhp と歯車の周速 v 、および角度 θ , Γ , ϕ , α を式(18)~(20)に代入すれば、 Va , Vb , Vc が求まり、式(5)より作用すくい角 ξ を得ることができる。切削中の回転角 ϕ は、和栗・相浦⁽³⁾ は上野・寺島⁽⁴⁾ からの計算式より求める。

2.4 すくい角付きホブの場合 図9はすくい角付きホブ ($\xi_0 \neq 0$) の作用すくい角の求め方を示す。すくい角付きホブの場合も、以上の解析で求めた V , Vr の値は全く変わらない。ただし、図9の右図に示す V , Vr を含む断面上において、すくい面上の速度成分 Vr' と Vr とのなす角 $\Delta\xi'$ だけ作用すくい角が増減する。速度成分 Vr' は、 Vr をホブ軸直角方向 Va' と

Fig. 9 Influence of rake angle ($\xi_0 \neq 0$)

ホブ軸平行方向 Vb' に分解すると、

$$Va' = Va \cos \alpha + Vb \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$Vb' = -Va \sin \alpha + Vb \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (22)$$

となる。

ここで、 ξ'_0 を半径 r_e の任意の切れ刃位置でのすくい角、ホブの外半径 r としその位置でのすくい角を ξ_0 とすると、

$$\sin \xi'_0 = (r/r_e) \sin \xi_0 \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。

$$\begin{aligned} Va' \tan \xi'_0 &= Vr \tan \Delta\xi' \text{ であるから, } \Delta\xi' \text{ は} \\ \Delta\xi' &= \tan^{-1} \{ (Va'/Vr) \tan \xi'_0 \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (24)$$

となる。

したがって、 $Va' = 0$ で Vr が Vb' と一致するとき $\Delta\xi' = 0^\circ$ となり、 $Va' = Vr$ のとき、 $\Delta\xi' = \xi_0$ となる。

したがって、すくい角付きホブの場合式(5)は次のようになる。

$$\xi = \pm \{ 90^\circ - (\Delta\xi \pm \Delta\xi') \} \quad \dots\dots\dots (25)$$

Table 2 The computed range

Items		Range
Normal module	m	1.0~3.0
Normal pressure angle	α	15° ~ 25°
Number of threads	Z_H	1~5
Hob diameter	d_o	60~100mm
Number of cutting edge	K	-6~+6
Rake angle	ξ_0	-5° ~ +10°
Turning angle	ϕ	0° ~ 20°
Number of teeth	Z_G	20~80
Helix angle	β_o	-30° ~ +30°
Addendum modification coefficient	X	-0.5~+0.5
Feed	f	3 mm/rev.

Fig. 10 The computed position on the cutting edge

Fig. 11 Comparison between the R. H. hob and the L. H. hob

3. 作用すくい角の計算

ここでは、ホブ・歯車および切削条件によって、作用すくい角がどう変化するのか、比較的モジュールの小さい歯車を対象に計算を行った。表2は計算した範囲を、図10は計算した切れ刃の位置を示す。刃番号 K は、図1のホブ軸上の原点 o にある刃を0番刃とし、それぞれの刃に0番刃から x 軸プラス方向に1, 2, 3, ..., x 軸マイナス方向に-1, -2, -3, ...と番号をつける。

切れ刃位置1, 2は左切れ刃、切れ刃位置3, 4は右切れ刃である。切れ刃位置2と3は刃先から $0.25 \times m$, 1と4は $2.25 \times m$ の位置にある。

3.1 ホブの影響 図11は右巻ホブと左巻ホブの比較である。いずれも、モジュール $m=2$, すくい角 $\xi_0=0^\circ$ の3条ホブで、歯数40の平歯車をコンベンショナルホブ切りする場合である。横軸の1, 2, 3, 4は、それぞれ図10に示した切れ刃位置である。縦軸は作用すくい角で、刃番号は0番刃, $\phi=0^\circ$ である。両ホブとも、右切れ刃と左切れ刃の作用すくい角の値が異

なる。また、右巻ホブの場合は右切れ刃、左巻ホブの場合は左切れ刃の作用すくい角が大きくなる。

このような傾向は作用逃げ角⁶⁾と同じであるが、それぞれ最小となる切れ刃の位置が異なる。

図12はモジュールの影響を示す。モジュールが大きくなるほど、左右切れ刃の作用すくい角の差が大きくなる。図13はホブ外径の影響である。外径が大きくなると、右切れ刃の刃元部4の作用すくい角は大きな正の値となるが、左切れ刃の刃元部1では逆に大きな負の値となる。このような傾向は、図14のホブを多条化した場合も同じである。

図15は、図12~14の計算に使用したホブの進み角 γ の影響を示す。いずれも右巻ホブで切れ刃位置は2である。ホブの進み角に比例して、作用すくい角は変化をする。進み角の大きい大モジュールホブや小径ホブ、および多条ホブ等は、左右切れ刃の作用すくい角の違いが大きく、注意が必要である。なお、ホブの刃番号 K の影響は0番刃から遠ざかるほど、0番刃の作用すくい角とは差がでてくるが、数値としてはわずかで、ホブの回転角 ϕ の影響も少ない。

図16はすくい角付きホブの作用すくい角を計算した結果である。いずれも、モジュール2の3条・右巻

Fig. 12 Influence of module

Fig. 13 Influence of hob diameter

Fig. 14 Influence of number of threads

Fig. 15 Influence of lead angle

Fig. 16 Influence of rake angle ξ_0

Fig. 17 Influence of hobbing method

きホブで、歯数 40 の平歯車をコンベンショナルホブ切りする場合である。すくい角 ξ_0 を 0° , $+5^\circ$, $+10^\circ$ と正の方向に増すと、右切れ刃は正の方向に大きくなり、左切れ刃は負の作用すくい角となる。また、すくい角 -5° では左右切れ刃の値が均等化する。これは左右の切れ刃で式 (18) の Va の正負、および式 (21) の Va' の正負が異なるため、図 5 の速度成分 V_{x2} の方向が影響する。

左巻きホブの場合は、すくい角を正の方向に増すと左切れ刃の作用すくい角は正の方向に大きくなり、右切れ刃が負の作用すくい角となる。すくい角 -5° のホブで左右切れ刃の値が均等化する傾向は右巻きホブと同じである。以上のように、ホブに正のすくい角を付けた場合、右巻きホブは右切れ刃、左巻きホブは左切れ刃の作用すくい角が正のほうに大きくなり、反対切れ刃では負のすくい角となる。

ホブや被削歯車の条件によってその数値は少し異な

Fig. 18 Roughness on tooth surface

るが、一般に、ホブの進み角に相当する程度の負のすくい角を付ければ、左右切れ刃のすくい角をほぼ均等にすることができる。また、左右切れ刃のどちら側にもどの程度の作用すくい角をつけたいか、その目的に応じて適切な作用すくい角を与えることが可能である。

3.2 被削歯車および切削条件の影響 図 17 は、はすば歯車のホブ切り法の影響を示す。右巻ホブでねじれ角 30° のはすば歯車をホブ切りする場合で、ホブの送り方向(コンベンショナルホブ切りとクライムホブ切り)の影響は比較的少ない。また、歯車の歯数の影響や転位係数の影響も少ない。以上のように、歯車の寸法は、ホブに比べると作用すくい角に及ぼす影響は少ない。

4. 作用すくい角が切削性能に及ぼす影響

図 18 は、図 18 中に示すモジュール 3 の A, B, C, D, E ホブを用い、作用すくい角が歯車の仕上面あらさに及ぼす影響を実験した結果である。炭素鋼 S 45 C 材 ($H_B 180$) の平歯車を仕上げホブ切りし、歯筋方向の歯面粗さを 4 歯測定し平均値で示した。横軸はホブの作用すくい角を示す。

切削速度は、いずれも 50 m/min で仕上げ代は 0.1 mm、切削油剤は粘度 $26 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (40°C) の有機モリブデン添加油、ホブ盤は KS 14 型生産ホブ盤を使用した。

作用すくい角が 5° 以上になると、左右歯面の粗さに差が出て、作用すくい角 (0 番刃, $\phi=0^\circ$) が -5° 以下の場合に歯面粗さが悪い。歯車の歯面粗さは、切りくずの理論厚さが厚い切れ刃で構成刃先が発生し低下する⁽⁶⁾が、図 18 のように切込量の少ない仕上げホブ切りでは、左右切れ刃の理論的切りくず厚さはあまり差がない⁽⁶⁾。したがって、この場合、作用すくい角の

Table 3 Dimensions of hob and gear

Hob			Gear		
Module	m	8	Module	m	8
Pressure angle	α	20°	Helix angle	β	0°
No. of threads		1·RH	No. of teeth	Z_G	26
No. of gashes	N	12	Face width	b	60mm
Rake angle	ξ_0	-30°	Material		SCM415
Material		P20+TiN	Hardness		HRC60

Fig. 19 Condition of the damage of skiving hob
(After cutting 10 gears, $V=53$ m/min, $f=2$ mm/rev.)

差が、歯面粗さに影響したものと考えられる。

図 19 は、表 3 に示すすくい角 $\xi_0 = -30^\circ$ の超硬スカイビングホブで、浸炭焼入れ歯車を仕上ホブ切りしたときの左右切れ刃の損傷の比較である。切込量(仕上げ代)は 0.1 mm でコンベンショナルカットである。右切れ刃の作用すくい角は約 -25° 、左切れ刃の作用すくい角は約 $+25^\circ$ である。作用すくいが負の右切れ刃で摩耗が大きい。切削機構に関する左右切れ刃

の相違点は、作用すくい角だけでなく、作用逃げ角⁽⁵⁾、食付角⁽⁷⁾等も同時に変化する。したがって、これらの実験だけで仕上げ面粗さや工具損傷の発生原因が作用すくい角にあると結論付けはできないが、ホブの切削性能に及ぼす一因子として作用すくい角を加えて検討することが今後必要と思われる。

5. 結 言

ホブと歯車の相対速度から、作用すくい角の解析法を明らかにした。その解析法に基づき、作用すくい角の数値計算を行い、ホブ・歯車および切削条件の影響を示した。

作用すくい角にはホブの進み角の影響が大きく、モジュールの大きいホブや小径ホブ等では、左右切れ刃の作用すくい角の差が大きくなる。

また、ホブにすくい角をつけた場合、それがどの程度作用すくい角に関与しているかを示し、左右切れ刃の作用すくい角を均等にする方法を示した。

文 献

- (1) 相浦正人・米倉将隆・永野喜三郎, 機論, 48-432, C (1982), 1235.
- (2) 和栗明・相浦正人, 久留米高専研究報告, 9(1968), 15.
- (3) 和栗明・相浦正人・川島, 機講論, No. 134(1965), 65.
- (4) 上野拓・寺島健一, 機論, 43-373(1977), 3535.
- (5) 永野喜三郎・米倉正人・桜木功, 機論, 60-573, C(1994), 312.
- (6) 梅崎洋二, 学位論文, (1982).
- (7) 永野喜三郎・米倉将隆・桜木功, 機論, 59-557, C(1993), 277.