鼓形ウォームホイール用ホブに関する研究*

(第3報, ホイール歯面にクラウニングを与えるホブの設計)

郡 原 宏^{*1}, 島 地 重 幸^{*2}

A Study on Hob for Hourglass Worm Wheel (3rd Report, Hob Design for Hourglass Worm Wheel with Crowned Teeth)

Hiroshi GUNBARA and Shigeyuki SHIMACHI

A new concept of a new type hob for hourglass worm wheel has been proposed. The hob can be used repeatedly when the cutting edges become worn. In this paper, the authors try to design the hob generating the crowned wheel tooth surface. In this purpose, the tooth profile data are modified to be desirable crowned form using the B-spline curve fitting method. The concept was applied to the design of a hob for wheel tooth generation of the hourglass worm gear generated by a tool with a conical surface. Numerical calculations show that both the crowned form and the amount of crowning are exactly controlled using the hob.

Key Words: Machine Element, Gear, Hourglass Worm Gear, Hob, Crowning, B-Spline Curve

1. 緒 言

理論上高い負荷能力が期待される鼓形ウォームギヤは、(1)組付時における取扱いの難しさ(2)運転時における歯当たりの悪化に伴う性能の劣化(3)生産性の高いホイール製作法が確立されていない等の理由により円筒ウォームギヤに比べて生産が進まないのが実状である。(1),(2)に関しては、種々の点接触鼓形ウォームギヤの開発や、運転時に予想される変位位置において歯当たりの変化が小さい性質をもつ鼓形ウォームギヤ⁽¹⁾⁽²⁾が提案されるなどによりある程度は問題解決に近づいてきたように思われる。しかし、(3)に関しては依然として有効な方法はなく、ランド付きホブ⁽³⁾を用いた加工、ローレンツ歯切り法によるヒンドレータイプの鼓形ホイール加工が現用に供されている程度である。また、ホイール製作の困難さを回避するためホイール歯面に製作が容易な曲面を与え、これが包絡する曲面をウォーム歯面としたウォームギヤ⁽⁴⁾も用いられている。しかし、前者は切削能率が上げ難

く、後者はウォームの二度接触によりホイールに付加される第2歯面が負荷の多くを受け持つことを考慮すると負荷能力の点から見て問題が残る。そこで、著者らはNC工作機械が持っている複数の加工自由度を駆使することにより製作が可能であるという前提にたち、生産性の高い鼓形ホイール創成用ホブ(以後、鼓形ホブという)の設計方式を提案した⁽⁵⁾。このホブは、切れ刃の2番が取ってあること、ならびに、切れ刃が摩耗してもすくい面を再研磨することにより、何度でも使用できること等の特徴を有している。そして、媒介歯車歯面に円すい面をもつ鼓形ウォームギヤのホブ設計を例にとり、被削ホブ基礎刃面創成時の工具軸とワーク軸間の軸間距離ならびに軸角を適切に選定すればホイール歯面全体を精度よく創成できること、また、必要に応じ第1歯面を切り落とすホイール歯面修整を施す設計にも適用できること⁽⁶⁾を示した。本報告では、提案した設計原理に基づいて開発したホイール歯面にクラウニングを与えるホブの設計法について述べる。

2. 基 本 原 理

提案した鼓形ホブの基本原理を以下に述べる。

鼓形ウォームギヤの諸元が与えられ、また、ウォー

* 原稿受付 1997年3月31日。

^{*1} 正員, 松江工業高等専門学校 (☎ 690-0865 松江市西生馬町14-4)。

^{*2} 正員, 岩手大学工学部 (☎ 020-0102 盛岡市上田4-3-5)。

ムならびにホイールの創成用工具、歯切り諸元が与えられるとウォームならびにホイール歯面が確定する。一般には、まずウォームを歯切りする工具の形状を与え、ウォーム歯面ならびにホブ基礎刃面を創成する。続いて、製作したホブを用いてホイール歯面を創成する。その場合、工具と被削ウォームの相對運動ならびにホブと被削ホイールの相對運動は、ホイールとウォームの相對運動と等しくする。ゆえに、ウォーム歯面とホブ基礎曲面は一般には同一の曲面である。本研究で提案するホブは、ウォーム歯面とは異なった基礎刃面を有しており、以下のように与えられる。

図1に示すように、基準となる切れ刃 $a-a$ は、ウォーム歯面と同一の曲面であるねじ面 S_0 の上にある。切れ刃の摩耗に伴い、すくい面 F_0 を再研磨した場合、新しい切れ刃 $b-b$ が出現する。切れ刃 $b-b$ は次のように定める。与えられる理論ホイール歯面を工具刃物面として創成されるねじ面 S_1 を求める。創成時、工具とワークの相對運動 M_1 を、ホイールとウォームの相對運動 M_0 と変化させる。求められた新しいねじ面と、基準すくい面 F_0 より研磨量 Δf_1 隔たった新しいすくい面 F_1 との交線を再研磨時に出現する切れ刃 $b-b$ とするのである。そして、切れ刃 $b-b$ を用い、ホブと被削ホイールの相對運動をねじ面 S_1 創成時の相對運動 M_1 と等しくしてホイール歯面を創成するのである。切れ刃 $a-a$ を用いるときに必要な2番がとれるように、切れ刃曲線 $b-b$ はホブ実質側に十分逃げておかねばならず、そうなるように工具とワークの相對運動 M_1 を定めるのである。同様な操作を繰返し、次の再研磨時に使用する切れ刃曲線 $c-c$, $d-d$, ... を求めていく。そして、これらの切れ刃曲線の連なる曲面をホブ基礎刃面とする。

3. ホブ基礎刃面創成用工具曲面の作成

上述の設計原理に従ってホブ基礎刃面を求めていく場合、これまでの報告ではホブ基礎刃面創成用工具曲

面として正規のホイール歯形を採用してきた。本報告では、ホイールにクラウニングを与えるため、工具曲面でもあるホイール歯形の一部を正規の形状から変える必要がある。一般には、ホイール歯面は点列の連なりとして与えられる。そこで、この歯面データの一部を望むクラウニング形状を有するように変更する。本研究では、まず、歯面上でクラウニングを与える領域内で代表点を設け、それらが想定したクラウニング量だけ歯面法線方向実質側に位置するように歯面データを修整する。続いて、修整した代表点を接続点とし、それらの間を B -spline 曲線を用いて補間し領域内の修整歯面データを作成する。

さて、例として歯幅方向油の巻き込み側を実質側に滑らかに逃がし、油の巻き込みを容易にする歯面修整を行う。その場合、任意の刻み幅で設けられた歯幅方向 (u 方向とする) m 個ならびに歯たけ方向 (v 方向とする) n 個の格子点から作られている正規ホイール歯面をもとにして、以下の要領で修整歯面データの作成を行う。

いま、任意の歯たけ位置において、 u 方向の格子点群に注目し、これらの中から、修整開始点 $P_{i,0}$ 、中間点 $P_{i,1}$ ならびに修整終了点 $P_{i,2}$ を選ぶ。これらの位置ベクトルをおのおの $\mathbf{x}_{i,0}$, $\mathbf{x}_{i,1}$, $\mathbf{x}_{i,2}$ とする。中間点と終了点における単位法線ベクトルならびに歯面法線方向への修整量をそれぞれ $\mathbf{n}_{i,1}$, $\mathbf{n}_{i,2}$, c_1 , c_2 とすると、修正点 $Q_{i,j}$ ($j=1, 2$) の位置ベクトル $\mathbf{y}_{i,j}$ は

$$\mathbf{y}_{i,j} = \mathbf{x}_{i,j} + c_{i,j} \cdot \mathbf{n}_{i,j} \quad (j=1, 2)$$

と定まる。3点 $Q_{i,j}$ ($j=0, 1, 2$) ($Q_{i,0}=P_{i,0}$) を接続点とし、山口の提案した方法⁽⁷⁾ により B -spline 曲線を用いて補間し、注目している歯たけ位置における歯幅方向の歯面データを正規歯面と同程度の個数作成した。なお、非修整領域と修整領域の接続部において両領域の接線が一致するように工夫している。同様な操作を新たな歯たけ方向の格子位置で行っていき、全修整領域部の歯面データを作成する。続いて、各点にお

Fig. 1 Cutting edges of the hob

Fig. 2 Crowned tooth surface

ける単位法線ベクトルは以下のように求めていく。歯面修整領域内の任意点 $Q_{i,k}$ における u 方向の接線ベクトル $t_{i,k,u}$ はすでに求まっている。そこで、 v 方向の n 個の格子点 $Q_{i,k} (k=1 \cdots n)$ を接続点として改めて B -spline 曲線を用いて補間することにより、注目点における v 方向の接線ベクトル $t_{i,k,v}$ を求める。単位法線 $n_{i,k}$ は

$$n_{i,k} = (t_{i,k,v} \times t_{i,k,u}) / \sqrt{(t_{i,k,v} \times t_{i,k,u})^2}$$

と与えられる。

4. 設 計 例

前述の設計原理に基づき、媒介歯車歯面に円すい面をもつ鼓形ウォームギヤ⁽⁸⁾を対象としてホブの設計を行った。軸間距離は 100 mm、歯数比 40/1 であり、ホイールは、ピッチ円直径 160 mm、歯幅 24 mm、有効歯たけ 8 mm とした。対象としたウォームギヤのホイール歯面は、媒介歯車歯面である円すい面と、ウォームの二度接触により作られる第 2 歯面が限界法線点曲線を境にして滑らかにつながった形状となっている。本研究では、ホブ基礎刃面創成用工具歯面としてホイール第 2 歯面を用いているが、基礎刃面創成時の被削ホブ軸と工具軸の間の軸間距離ならびに軸角を適切に選定することにより、すくい面再研磨時の切れ刃により、ホイール第 1 歯面までも精度よく創成する。ホブの設計諸元を表 1 に示す。本研究では、切れ刃溝をホブ軸に平行に入れるものとし、基準すくい面 F_0 は、ホブ軸を含む平面とした。切れ刃 $b-b$, $c-c$ は F_0 に平行で Δh_1 , Δh_2 離れた再研磨時のすくい面 F_1 , F_2 上にある。図 3 にホブ基礎刃面創成時の各軸の関係を示す。各切れ刃を含むねじ面を創成するときの被削ね

じ軸と工具軸の間の軸間距離を e_{ci} 、軸角を β (工具軸方向から見てねじ軸が両軸の共通垂線を中心として反時計方向に回転する角度を $\beta > 0$ としている) とする。なお、被削ねじ軸と工具軸の回転比は、ホイール軸とウォーム軸の回転比と一致させている。歯面修整は、ホイール中央平面より歯幅方向油の巻き込み側に 6, 9, 12 mm 隔たった所をそれぞれ修整開始、中間、修整終了位置とし、修整量は中間、終了点で歯たけ方向に一樣にそれぞれ 0.1, 0.4 mm とした。

図 4(a) は、再研磨時のすくい面 F_2 上の切れ刃 $c-c$ が、ホイール歯面を創成していくようすを示している。ホブ軸と被削ホイール軸の関係は切れ刃 $c-c$ を含むホブ基礎ねじ面設計時の被削ねじ軸と工具軸の関係と同一である。ホイール軸を中心とし、ホイールとともに回転する半径 80 mm の円筒面に各切れ刃が描く軌跡を計算し、円筒を展開して示している。円筒の高さ方向(ホイール歯幅方向)を h とし、円筒上の基準

(a)

(b)

Table 1 Basic dimensions of cutting edges

Face	Cutting edge	e_{ci} (mm)	β (deg)	Δt_i (mm)
F_0	a-a	100	0	0
F_1	b-b	99.5	-0.15	0.5
F_2	c-c	99	-0.2	1

Fig. 3 Relationships between gear axes

Fig. 4 Loci of cutting edges

Fig. 5 Tooth profile of the wheel

位置から円周方向に測った距離を L としている。図 4 中、太い実線が理論ホイール歯面を上記円筒により切断した断面歯形を示し、細線が各切れ刃の描く軌跡を示している。図 4(b) は、位相が 90° ずつ隔たったホブ入り口側の切れ刃の描く軌跡を示している。

図 5(a), (b) は、このホブによって創成されたホ

イール歯面主要部の形状を示したものである。歯幅ならびに歯たけ方向に 1 mm の間隔で設けた格子点における歯面座標値を正規歯面のそれと比較して誤差の形で示している。なお、ホブは、長さを 40 mm とし、切れ刃溝数を 6 溝に設定している。図 5(a) は第 2 歯面側から眺めた図であり、図 5(b) は第 1 歯面側から見た図である。第 1 歯面側は歯底に向かってクラウニング量が増加する傾向にある。

5. 結 言

すでに提案した鼓形ウォームホイール用ホブの設計原理に基づき、ホイール歯面にクラウニングを施すホブの設計法を提案した。円すい面包絡鼓形ウォームギヤを対象としたホブ設計を行い、数値解法によるホイール歯面創成のシミュレーションにより、このホブにより歯面修整形状ならびに修整量を自由に制御できることを示した。

文 献

- (1) 島地重幸・ほか 3 名, 機論, **56**-525, C(1990), 1298-1302.
- (2) 島地重幸・ほか 3 名, 機論, **57**-539, C(1991), 2385-2349.
- (3) 田村久司・ほか 2 名, 機論, **47**-415, C(1981), 350-358.
- (4) 例えば, 佐藤伸一・福井和雄, 機論, **20**-94(1954), 377-382.
- (5) 島地重幸・郡原宏, 機論, **62**-603, C(1996), 252-256.
- (6) 郡原宏・島地重幸, 機講論, No. 95-10(1995), 254-255.
- (7) 山口富士夫, 精密機械, **43**-9(1997), 1005-1011.
- (8) 田村久司・ほか 2 名, 機論, **46**-402, C(1980), 179-187.