簡単な工具と NC による歯車の加工に関する研究*

(ウォームホイールの加工)

島 地 重 幸**, 酒 井 高 男***
宮 崎 紳 夫†, 奥 田 修††

A Method of NC Gear Cutting with Simply Shaped Tool

(Application to Worm Wheel Cutting)

by Shigeyuki SHIMACHI, Takao SAKAI,
Takao MIYAZAKI, and Osamu OKUDA

The most conventional method of getting the correct tooth surface of an hourglass worm wheel is to cut the wheel by a hob cutter which has the same external shape as the worm. This method, however, is too troublesome for getting the correct hob, especially in the case of small production. In such a case, it is more convenient to adopt the so-called fly tool method. The approximation of this method, however, is not so good.

This paper processes a new method whereby a curved edged cutter is controlled numerically so as to trace the theoretical tooth surface of the wheel in such a manner that several traces of the cutter can envelope a surface which is close enough to the theoretical one. From the trial cutting, the paper also extracted some accompanying problems and gave solutions to some of them.

Key Words: Hourglass Worm Gear, Worm Wheel, NC Gear Cutting, Fly Tool

1. 緒 言

鼓形ウォームギヤは鼓形ウォームとホイールとがかみあったものである。その鼓形ウォームは、簡単な形状のバイトや砥石面により作られる。その工作精度は比較的良く、工作上の問題は少ない。ところが、ホイールを正確に工作するにはウォームと同形のホブによる直接創成歯切り以外に有効な方法がなく、各メーカーの悩みとなっている。この直接創成法も小形のウォームギヤのように大量生産する場合には適しているが、中形や大形ウォームギヤのように多種小量生産する場合には極めて不経済である。現実には、このような場合、舞ツールによりホイール歯面を近似的に作り、手修正したり、長時間をかけてなじませたりして歯当たりを出している。これが、生産性を低くしている。そこで、小量生産向けの歯切り法として、ホイールの回転と工具のそれを同時に数値制御 (NC) しながらホイール歯面を削り出す方法を考案した。

歯車工作での NC 技術の利用は広く行われているが、その多くは段取り作業の自動化にある。これに対して本歯切り法の特徴は、NC により工具とワークの相対的な位置を任意の関数関係で与えることができる点を利用した歯車加工法の一つであることにある。極めてあいまいで不確かなことではあるが、歯車の工作では工具形状の複雑さと工具運動の複雑さとの積はほぼ一定であるとみなせるものと、著者らは考えている。すなわち、NC を利用して複雑な形状工具を作り、歯切りは簡単な運動を行う歯切り盤で、量産を行う方法が一方にあり、他方には、簡単な工具を NC を利用して複雑に動かして単品生産を行う方法があると考ええる。この考えによる場合、本研究の歯切り法は後者に属することになる。

本歯切り法によれば、理論的に求めたホイール歯面に修正を加えることは極めて容易である。また、工具の動きを与えるデータを変えるだけで、さまざまな種類、仕様のホイールの加工ができる。本研究ではこの歯切り法を具体化するときの諸問題について考察した。

2. 歯 切 り 法 の 原 理

簡単な形状の切れ刃を持つバイトが工具軸の回りに

* 昭和60年8月28日 第22回シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和61年1月20日。

** 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻字青葉)。

*** 正員、山形大学工学部 (〒992 米沢市城南4-3-16)。

† 富士フイルム(株) (〒106 東京都港区西麻布2-26-30)。

†† 東北大学大学院。

回る鏝ツールによる歯切りを考える。被削歯車の回転につれて、その切れ刃が理論歯面上を歯面に食い込むことなくなぞるように、被削歯車の回転と工具のそれを同時に制御する。これだけでは、切れ刃がなぞった部分しか歯面は仕上がらない。そこで、切れ刃が歯面を通過するごとに、切れ刃がなぞる部分の位置が変わるように、工具軸と歯車軸の相対位置を変更する。こうして歯面の全域を歯切りする。

3. 試作ウォームギヤの理論的形状

自作の容易さを考慮し、転位異速方式のウォームギヤ⁽¹⁾のホイールの歯切りを例として、本歯切り法を試みることにした。

便宜上、ベクトル A をベクトル C 軸の回りに角 ϕ だけ回転させて得られるベクトル B を、

$$B = R(C, \phi)A \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表すことにする。

ウォーム軸、ホイール軸そしてウォーム歯切り工具軸の各軸の共通垂線が各々の軸と交わる点を、それぞれ O_1, O_2, O_3 、またそれぞれの軸の回転速度ベクトルを $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ それぞれの単位ベクトルを ξ_1, ξ_2, ξ_3 とする。回転の基準位置におけるウォーム歯切り工具の切れ刃直線の方法を単位ベクトル b 、その切れ刃直線上の点を $P_i (r_{i3} = \overrightarrow{O_3 P_i})$ とする。このとき、切れ刃直線上の点 P は $\overrightarrow{P_i P} = \lambda$ とし

$$r_3 = r_{i3} + \lambda b \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表される。

ウォームが角 ϕ 回転し、ウォーム歯切り工具が角 $n\phi$ 回転するとき、点 P は点 P' に移る。点 P' の位置 $\overrightarrow{O_1 P'} \equiv r'_1$ は $r_c = \overrightarrow{O_1 O_3}$ として、

$$r'_1 = r_c + R(\xi_3, n\phi)r_3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表されるから、基準位置でのウォーム歯面上の点 $P_{w1} (\overrightarrow{O_1 P_{w1}} = r_{w1})$ は、

$$r_{w1} = R(\xi_1, -\phi)r'_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

図 1 転位異速ウォームギヤの車軸とカット切れ刃

で与えられる。

ウォーム歯切り点 P' における歯面法線 n' は切れ刃直線 b' とウォームと工具の相対速度 v_{31} に垂直であるから、

$$b' = R(\xi_3, n\phi)b \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$v_{31} = \omega_3 \times (r'_1 - r_c) - \omega_1 \times r'_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$n' = v_{31} \times b' / |v_{31} \times b'| \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表される。したがって基準位置での歯面法線 n は

$$n = R(\xi_1, \phi)n' \quad \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。

ウォームを基準位置から角 θ 回転させると点 P_{w1} は点 P_{w1}' に移る。この点でウォームとホイールが接触するための条件は、

$$n_{w1}' \cdot v_{21} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表される。ここに、 $\overrightarrow{O_1 O_2} = r_H$ とし、

$$n_{w1}' = R(\xi_1, \theta)n \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} r_{w1}' &= R(\xi_1, \theta)r_{w1} \\ v_{21} &= \omega_2 \times (r_{w1}' - r_H) - \omega_1 \times r_{w1}' \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(9)は θ と ϕ を与えれば λ についての二次方程式になり、解析的に解ける。このとき、基準位置におけるホイール歯面上の点 P_{w2} および歯面法線は

$$r'_{w2} = R(\xi_2, -m\theta)(r'_{w1} - r_H) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$n'_{w2} = R(\xi_2, -m\theta)n'_{w1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

で与えられる。これでホイール歯面とその面法線は θ と ϕ の2変数で表されたことになる。歯面の相対曲率の求め方⁽²⁾については省略する。

試作ウォームギヤの主要諸元を図2に示す。速度比が $m=4/40$ 、ウォームのねじ切り回転比が $n=3/40$ の転位異速方式の鼓形ウォームギヤである。図3に、そ

図 2 試作ウォームギヤの主要寸法

の歯面の接触線, 相対曲率半径を示す。ホイールの歯切りは, 速度比が大きいくほど困難とされていることから, 例 $m=1/10$ を選んだ。歯面圧力角は普通のものより小さいが, 特別な意図はない。歯切りとすれば, より困難な圧力角といえる。歯面上には相対曲率が負となり, 曲率干渉の生ずる部分があるが, この部分は削り取ることになる。ウォームギヤでは, ウォームの一回転中に, ウォーム歯面上の一点が2回, ホイールと接触するものが多いが, この例では1回だけ接触するように接触線を設計してある。

4. 歯面をなぞる工具の運動

ホイール軸とホイール歯切り工具軸の軸の共通垂線が, ホイール軸と交わる点を原点 O_2 , それが工具軸と交わる点を O_4 とする。また, 工具軸の回転角速度ベクトルを ω_4 , その方向の単位ベクトルを ζ_4 とする。基準位置からホイールを角 ψ 回転させるときのホイール歯面上の点 R を r , この点での面法線を n とする。ベクトル r, n はともに二つのパラメータ θ と ϕ で表されることはすでに述べた。工具切れ刃曲線として円弧を採用し, その中心を C_c , 基準点から角 γ の位置にある切れ刃円弧上の点 Q を q , その点での切れ刃線の接線ベクトルを t とする。これらのベクトル q, t は, 工具の回転角 θ_c を含めると二つのパラメータ (θ_c, γ) で表される。図4にこれらの関係を示す。このとき, 切れ刃線上の点 Q が歯面上の点 R で接触するための条件は,

$$r - q = 0 \quad (14)$$

$$n \cdot t = 0 \quad (15)$$

で表される。パラメータ4個に対し, 4本の式があるから, ホイールの回転角 ψ に対して, 工具の回転角 θ_c

図3 試作ウォームギヤの接触線と相対曲率半径

が求まる。試作に用いた舞ツールの外形を図5に示す。切れ刃曲線と歯面間の曲率干渉, 交せつ干渉を吟味する必要があるが, これは今後の問題であると考えている。ここでは, これらの干渉を確実に避けるため, 切れ刃円弧の半径を小さい値 $R_c=10$ としている。

5. 試行歯切りでの諸問題

5.1 工具の運動の数値解法 式(14), (15)はいずれも超越関数である。逐次近似計算を行うとき, 4本の式をこのまま連立させる解法では, 収束は遅く, 精度も悪く, 実用になりにくい。そこで, 歯面を点 R での接平面 T で近似し, 4個のパラメータのうちの2個の近似値を次に述べる方法で解析的に求めることにより, 逐次近似を行うパラメータの数を見掛け上2個にし, 計算時間を短縮した。

歯面上の点 R を与える二つのパラメータは逐次近似法で求めることにし, ここではとりあえず点 R が与えられたものとする。つまり, その位置ベクトル r , その点での面法線 n , その接平面 T はそれぞれ定まっているものとする。切れ刃円弧が接平面 T と接触する工具回転角を θ_c とし, その第零近似値 θ_{c*} が与えられ

図4 ホイール歯面をなぞる切れ刃

図5 円弧切れ刃を持つ舞ツール

たとする。そしてこの工具回転位置 θ_{c*} で切れ刃円弧が、接平面 T の平行平面 T_* と、点 Q_* で接触しているものとする。切れ刃円弧の中心を C_{c*} 円の半径を R_c 、切れ刃円弧を含む平面の法線を c_{n*} とするとき、点 Q_* の位置 q_* は、

$$\vec{O_2Q_*} = q_* = \vec{O_2O_4} + R(\xi_4, \theta_{c*})\vec{O_4C_{c*}} + a_* \quad \cdots (16)$$

ここに、

$$t_* = n \times c_{n*} / |n \times c_{n*}| \quad \cdots (17)$$

$$a_* = R_c t_* \times c_{n*} / |t_* \times c_{n*}| \quad \cdots (18)$$

で表される。さて、ここで、工具が微小回転 $\Delta\theta$ し、その回転位置が $\theta_{c**} = \theta_{c*} + \Delta\theta$ となっても、中心 C_{c**} から接触点 Q_{**} に向かうベクトル a_{**} は近似的に $a_{**} \approx a_*$ である。このとき、接触点 Q_{**} が平面 T の上にあるためには

$$n \cdot (\vec{O_2Q_{**}} - r) = 0 \quad \cdots (19)$$

を満たす必要がある。ベクトル $\vec{O_2Q_{**}}$ は式(16)と同じ形であり、式(19)は $\sin \theta_{c*}$ の項、 $\cos \theta_{c*}$ の項、定数項だけからなり、角 θ_{c*} の近似値 θ_{c**} は解析的に求められる。これで、切れ刃円弧上の点 Q_{c**} を表すパラメータ γ_{**} と工具回転角を表すパラメータ θ_{c**} の二つが近似値として与えられる。歯面上の点 R を与える二つのパラメータを求める逐次近似値の打ち切り精度は $|\vec{O_2Q_{**}} - r| < 5 \mu\text{m}$ とした。ホイール軸とホイール歯切り工具軸の軸間距離を 1 mm ずつ変えて求めた角 ψ と角 θ_c の関係を図 6 に示す。ここに、基準位置での切れ刃円弧の位置と姿勢を

$$\vec{O_4C_c} = (5.00, 34.31, -3.93)$$

$$C_n = (\sin 16^\circ, 0, \cos 16^\circ)$$

とした。

5.2 曲率干渉部分の歯面修正 歯面間の相対曲率が負となるホイール歯面部分は削り落とし、修正する必要がある。これを削り落とす際、歯面の完全部分から修正部分にカッタを動かすべきか(方向 A)、その逆にすべきか(方向 B)という問題がある。二つの歯面部分の過渡的なカッタの運動の制御誤差を考える

図 6 舞ツールとホイールの運動

と、方向 A の場合には歯面の完全部分の精度は良いが、方向 B の場合には歯面完全部分には制御誤差がそのまま現れることになる。ところが、後節 5.6 で述べるホイール駆動系のバックラッシの問題のため、カッタの動きは方向 B でなければならない。このことも含め、修正部分を歯切りする方法については改めて検討する必要があると考えている。この度は、歯面完全部分と修正部分を 2 回に分けて歯切りを行うことにした。この場合にも、歯面修正部分の歯切りでは、修正量をどの程度にすればよいかという問題、歯面完全部分の領域を通過するカッタの運動をどのようにすればよいかという問題が出てきた。これらの問題に対しては、歯面完全部分のカッタの動きを基準に、図 7 に示すようにカッタを動かして、修正部の歯切りを行った。修正の領域については、図 2 に示す歯面の曲率干渉の生ずる領域を十分に含むように定め、修正量については、全く無根拠にその量を決めた。この修正量の決め方についても今後の問題と考えている。

5.3 カッタと歯面の干渉 カッタ切れ刃上の各点において、カッタと歯面との相対速度方向を基に、余裕を持った逃げ角をカッタに与えた。カッタと歯面の干渉を避けるためには、これだけでは不十分である。カッタの逃げ面が歯面と干渉しないように、カッタが歯溝から抜け出る部分の運動を決める必要がある。本報のホイールの歯切りでは、カッタの運動を表す図 6 の曲線の出口部分に、曲線の接線方向に直線で表される運動を付け加えるだけで十分であることがわかった。

5.4 カッタ回転角速度の変動 ワークの慣性モーメントがカッタのそれと比べて大きいことを考慮し、ワークの回転角速度を一定にとることにした。このため、カッタの回転角速度だけが変動する。制御誤

図 7 歯形修正部を切削する工具の動き

差が歯面の形状精度を損なわないために、歯面をなぞる部分およびそこに入る部分で、カッタの速度が急変しないように配慮した。ただし、歯溝を抜け出た部分ではこの配慮は不用になる。また、切削時および空転時の速度を共に速くし、歯切り時間を短縮するには、カッタの一回転中も速度の変動は小さいほうが有利である。さらに、カッタが途中で止まったり、逆転しないようにした。このため、カッタが N_H 枚とばしに歯切りできるように、カッタの回転を計画した。カッタ回転の速度変動の一例を図8に示す。

5.5 歯面の切り残し量 切れ刃は歯面上の曲線にそって歯面をなぞり、歯面上のすべての点をなぞるわけではない。このため、ホブ切りにおける多角形誤

図8 舞ツールの一回転中の速度変動 ($N_H=6, Y_c=-114$)

図9 歯面の切り残し

図10 歯切り装置の機械部分

差に対応する歯面の切り残しができる。定性的には、切れ刃円弧の径を大きくし、切れ刃がなぞる線の間隔を密にすれば切り残し量は少なくなる。しかし、先に述べたように、干渉を回避しなければならないこと、切れ刃がなぞる曲線を歯面に適度に分散させる必要があることや、歯切り所用時間にも配慮する必要があることもあり、ここでは、とりあえず切れ刃円半径を $R_c=10$ とした。

本歯切り法では、ウォームとホイールの軸の共通垂線の近傍に切れ刃を設置した。切り残し量と切込みステップ数の比に注目するとき、ヒンドレーウォームホ

図11 数値制御系

図12 ウォームの外観

図13 試作ホイール歯面

図 14 軸回転固定時の歯当たり

ホイールの舞ツール切りのように、ウォームの軸方向端の近くに切れ刃を設置する方法も検討する必要がある。これについても、今後の課題と考えている。

6. ホイールおよびウォームの試作

6.1 歯切り装置 本歯切り法はホブ盤で実現するのが適当であると考えている。ただ、本試作では、フライス盤の手動部にモータを取りつけて数値制御できるように改造した装置が手もとにあったので、これをそのまま利用することにした。機械装置の外観を図 10 に示す。また制御部のブロックダイアグラムを図 11 に示す。

主計算機 (1) で、切込み 1 mm ごとの、図 7 に示すデータをあらかじめ作り、これをファイルしておく。歯切り時には、これらのデータを基に 1 mm 間隔の間をさらに 2~4 等分した切込み位置のデータを直線補間法で作成し、細分化した点列のデータとして従計算機に送る。インタフェース部では、座標点を次々に直線で結ぶようなパルス列をサーボアンプに送る。

6.2 歯切りと歯当たり試験 塩化ビニールを素材とし、ウォームおよびホイールを歯切りした。ウォームを図 12 に、またホイール歯面の拡大写真を図 13 に示す。ホイールの歯元の歯幅端にある切り下げは、舞カッタの刃先端の幅を正規の歯溝幅よりも大きくす

るという単純ミスのため生じた部分である。

ウォーム歯面に光明丹を塗り、ウォームを止めたまま、ホイールを回転させてかみあわせる。このとき、ホイール歯面上に光明丹の当たりが得られる。その一例を図 14 に示す。歯当たり位置は図 2 に示す接触線にほぼ対応している。ホイールの歯先端に当たりが見られる。これは、歯先線よりも外の空間部分 ($-Y_c > 120$ mm) はすべて歯先 ($-Y_c = 120$ mm) のデータを用いてカッタを空転させたつもりでいたが、実際には歯切りを行い、予定外の不完全歯面が歯先に生じたためである。また、ホイール歯面の歯幅端 (1) に軽い歯当たりが見られる。これは、ウォーム歯面の工作誤差が大きいためではないかと考えている。試みに、ウォームの歯面形状の誤差の概要を調べてみた。図 11 に示すカッタ用の減速機の誤差、ワーク用のそれを含めたウォーム歯面の誤差は図 14 に示す 2~5 の範囲では 5/100 mm 幅に入っているが 1~2 では歯の空間側に 20~30/100 mm の誤差があった。

上述のように、いくつかの問題点が残ってはいるが、ほぼ全歯面に歯当たりが得られる程度の形状精度で歯切りできたと考える。

7. 結 言

ウォームホイールの回転角と舞ツールのそれを同時に制御することにより、ウォームホイールを歯切りする方法を提案した。塩化ビニールを素材とするホイールの歯切りを行った。この試行を通して、この歯切り法を具体化するとき現れる諸問題を抽出し、それぞれの対策法を示した。

今後に残された問題もあるが、本研究によって本歯切り法の実用可能性を高めることができたと思う。

歯車の試作に必要なさまざまな補助具の制作は、東北大学工学部、鈴木正俊技官によるものである。ここに記し、深謝の意を表す。

文 献

- (1) 豊山, 機論, 28-196 (昭 37), 1676.
- (2) 酒井, 機論, 21-102 (昭 30), 164.

討 論

〔質問〕 田村久司〔新潟大学工学部〕

(1) ホイール歯面とその法線が数式で表示できず、かつウォーム歯面が二度接触するようなホイールの歯切りも、原理的には貴法の適用は可能であろうが、

実現の見通しはあるか。

(2) 図 8 で、 $N_H = 6$ としたときのホイールの歯数は何枚か。任意の歯数の歯切りは可能か。

〔回答〕 (1) ウォーム歯面が二度接触するよう

なホイール歯面の各部の曲率に注目すると、その曲率が小さい部分と、それが大きくしかも急変する部分とを併せ持つ場合がある。この後者の部分を切れ刃が高速でなぞるように制御することは難しいと考える。しかし、そのような歯面部分の負荷能力はほとんどないと考え、本試作では無視することにして、切り落としである。

(2) 図8は $N_H=6$ でホイール歯数が40枚の場合の一つのサイクルを示す。サイクルとサイクルの間に、舞ツールは止めてホイールだけを回転させることができるので、任意の歯数の歯切りが可能である。

〔質問〕 堀内 昭世(住友重機械工業(株)名古屋製造所)

(1) 予想される加工精度とコストについて

例えば、NCにより創出された平面くし形工具の利用と本研究のものと、現時点および将来について比較願えないか。

(2) 本例では、中心距離100 mm、減速比10で最

大近似誤差0.2~0.3 mmとある。この数値は計算上どの程度になるか。

計算上も同様であるとすれば、1本バイトでは近似精度に限界ありと考えるべきなのであろうか。計算上小さいとすれば、機械の制御系の誤差と考えるべきなのか。

〔回答〕 (1) NCにより創出された平面くし形工具による加工精度についての知見を持たず、また、本方式で問題となる制御誤差改善の可能性についても未検討なので、加工精度の比較は現時点ではできない。加工コストに関しては、同形のものを多量に作る場合にはくし形工具が、また、多種少量生産の場合には本方式が適すると考える。

(2) ご指摘の加工精度0.2~0.3 mmは、従来方式のホブ盤で歯切りしたときのウォームのものである。ウォーム素材が柔らかいための変形とか、カット駆動系のバックラッシュなどがこの誤差の主な原因ではないかと考えている。