簡単な工具と NC による歯車の加工に関する研究*

(第 3 報, エンドミルによるウォームホイールの加工)

島 地 重 幸^{*1}, 奥 田 修^{*2}

A Method of NC Gear Cutting with a Simply Shaped Tool

(3rd Report, Worm Wheel Cutting with an End Mill)

Shigeyuki SHIMACHI and Osamu OKUDA

The so-called fly tool method of cutting hourglass shaped worm wheels offers an economical production of large-size worm gears. This method however, gives us only an approximate tooth surface of the wheel. The previous reports introduced the numerical control (NC) technique to the fly tool method for making a tool which is able to trace the wheel surface. The fly tool method demands high responsibility of the NC servo to obtain a high cutting speed. To prevent the speed problem, this report discusses two methods of end milling: (1) the end mill tool is driven as the tool of the fly tool method, and (2) the tool is fed in the orthogonal three directions. The tooth profile errors of wheels cut with these two methods are investigated. Compared to the latter method, the first method gives a higher precision of profile, but it is difficult to realize the motion of the tool. A bronze wheel is cut for a trial with the latter method, and the tooth bearing pattern is checked. A method of tooth surface modification is proposed.

Key Words: Gear, Worm Gear, Hourglass Worm Gear, NC Gear Cutting, Endmilling, Worm Wheel Cutting

1. 緒 言

大形ウォームギヤは多種少量生産品の一つである。専用の工具が作れないこともあり、大形ウォームギヤのホイールの加工法の開発が望まれている。

第 1 報⁽¹⁾では、この多種少量の問題を念頭に置き、円弧切刃という簡単な形状の工具の位置を数値制御することによりホイール歯面を歯切りすることを試みた。しかし、工具が歯面をなぞって創成するための回数が多という問題が出てきた。第 2 報⁽²⁾では歯形に近い形の切刃を与える方法によって、その創成回数を少なくできることを述べた。ところで、これらの方法では、時間当たりの切削能率を上げるには、高速に切刃の位置を制御しなければならず、したがって高い制御性能が要求される。

本報のねらいは、切屑排出速度の点ではバイトよりも優れているエンドミルを用いることにより、切削能率を落とさず、しかも工具の移動速度を小さくして制御応答性の問題を解決することである。また、エンドミルの形状を歯形に近似し、しかも汎用性のある円す

い面とすることにより、創成回数を少なくする方法も取り込む。本研究では、このとき歯形精度の問題がどの程度解決できるかを調べる。

2. ウォームギヤの主要諸元

前報⁽²⁾と同様、転位異速方式鼓形ウォームギヤ⁽³⁾を具体例として扱う。

軸角直角で速比 m のウォームギヤを考える。このウォームの歯切りにおいては、ホイール軸に平行でしかも車軸の共通垂線を通るように工具軸を定め、そのまわりにねじ切り比 n で直線切刃を旋回させ、ウォーム歯面を作る。車軸の共通垂線とウォーム軸、ホイール軸、工具軸との交点を各々 O_1, O_2, O_3 とする。また、ホイールの回転運動と工具のそののピッチ点を P_1 とし、点 P_1 での圧力角を α_0 、工具の基礎円半径を r_{bc} 、距離 $\overline{O_1P_1} = l_{RO}$ 、 $\overline{O_1O_2} = r_H$ 、 $\overline{O_1O_3} = r_C$ とする。本報で扱うウォームギヤの諸元を表 1 に、その接触線を図 1 に示す。

3. 舞い回転するエンドミルによる歯切り

ローレンツ法のバイトの代わりに円すいエンドミルを置き、これが舞い回転軸の回りに回転しながらホイ

* 昭和 63 年 11 月 23 日 中国四国支部・九州支部合同岡山地方講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 4 月 25 日。

^{*1} 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻字青葉)。

^{*2} 松下電器産業(株) (〒571 門真市松葉町)。

ール歯面の歯筋をなぞるように歯切りする方法を考える。円すいエンドミルがホイール歯面上の定まったある点と接触できるようにするため、円すいエンドミルは舞い回転と同時にウォーム軸方向にも運動できるものとする。このような複雑な動きを精度良く実現するのは困難であるが、次節の方法と比較するため、この方法を調べる。紙面の都合で条件の詳細は省略する。

歯面法線方向に切り残し量を測り、これを歯切り誤差とする。舞い回転軸をウォーム軸の位置に設定する場合の歯切り誤差の一例を図2に示す。また、舞い回転軸をウォーム軸に対して傾ける場合の歯切り誤差の一例を図3に示す。

歯切り誤差曲線の形は歯面全体にわたってほぼ同形である。したがって、円すいを少し樽形にしたエンドミルを用いれば、1/100 mm 程度まで誤差を少なくできることがわかる。また、軸断面の形によっては、ただ一度の仕上げ削りでクラウニングの付いたホイールを作ることでもできることがわかる。さらに、舞い回転軸を傾けることによる歯切り誤差への効果は前報⁽²⁾で述べたバイト切りの場合ほど大きくはないこともわかる。

4. 直交三軸可動のエンドミルによる歯切り

前章の方法では、エンドミルはかなり複雑に動く。このような動きを精度良く実現するのは困難である。そこで、本章では NC フライス盤あるいはマシニングセンタに NC ロータリーテーブルを付加した装置を想定する。すなわち、円すいは直交三軸に可動とし、これにホイールの回転を加えた四つの自由度を与える。

4.1 拘束条件 ホイール歯面に円すい面を接触させるとき、接触点を与えても、直交三軸に可動な円すい面の位置は唯一には定まらない。それゆえ、接触点の円すい母線長を与えることにした。

4.2 歯切り誤差 図4に歯切り誤差を示す。前章の方法と比べて歯切り誤差曲線の形の変化が大きい。また、のど部から入口側無効歯面に向かって切り過ぎ干渉をおこしていることがわかる。

表 1 事例とした転位異速ウォームギヤの主要諸元

		CASE I	CASE III
Center distance	Γ_H	200	200
Worm threading tool distance	Γ_C	213.07	213.07
Distance of basic point	L_{RO}	21.36	21.36
Radius of base circle	Γ_{BC}	71	71
Pressure angle (degree)	α_0	21.738	21.738
Gear ratio	m	4/41	8/41
Threading speed ratio	n	4/44	8/44
Pitch radius of wheel	Γ_{HP}	166.50	166.50
Tooth depth		14	14
Addendum		6.50	6.50

このように、本章の方法は歯切り誤差の点から必ずしも良い方法とは言えない。しかし、この方法は歯切装置の機構が簡単で精度の保証が容易である。また、汎用の機械を利用することにより容易に実現できる利点もある。そこで次に、この方法において歯切り誤差

図 1 円周線方向に投影したホイール歯面上の接触線

図 2 舞い回転するエンドミルによる歯切り法での歯形誤差 (特に断らない限り CASE I)

図 3 エンドミル舞い回転軸を傾ける場合の歯形誤差

図 4 直交三軸動エンドミル歯切法での歯形誤差 (歯筋線を歯たけ中央に設定した場合)

を少なくする方策を考えてみる。

歯切り誤差は歯面全体では大きいですが、接触点の近傍、すなわち歯面の約 1/3 以内では工作精度 (1/100 mm) 内に入っている。このことから歯筋線に相当する線を歯先、歯底にも設け仕上げ加工を行えば、ほぼ歯面全体にわたって高精度なホイールが期待できる。

次に、切り過ぎ干渉している部分に注目する。この部分は、歯面の相対曲率が大きく負荷能力の小さい領域である。したがって、切り過ぎ干渉による負荷能力の低下は無視できると考える。また歯先、歯底にはクラウニングを付ける必要があるが、切り過ぎ量が小さければクラウニングの中に取り込まれてしまう。

5. ホイールの試作と歯当たり試験

5.1 歯面の歯先部分と歯底部分 歯筋線を歯面の中央部に設置するとき、のど部を除いて歯先と歯底は切り残される。これを除くため、歯筋線に相当する線をさらに2本設置して歯面を仕上げる。図5は試作ホイールに与えた歯筋相当線および歯切り誤差の一例である。歯筋相当線の近傍では歯切り誤差は 1/100 mm 以内に納まっている。歯切り装置の工作精度は 1/100 mm と考えており、その意味で歯切り誤差は工作精度内である。

5.2 荒削りと無効歯面部分 ローレンツ法ではウォームのかみ込み端の歯形を代表する切刃を用いて

歯面が作られる。ホイールの歯面の無効歯面部分は、この曲面上にあるはずである。他方、本研究では、荒削りから仕上げまで1本のエンドミルで行い、作業能率を向上させたい。そこで、荒削りにはローレンツ法で切られる曲面をエンドミルで切ることにより行う。

荒削り曲面に対し同様にして歯筋線を与えて円すいを接触させていく。歯筋線および歯切り誤差を図6に示す。都合良く、無効歯面の歯底と歯先は切り過ぎになっており、歯面の干渉はないと予想できる。

5.3 歯切り装置 本研究では万能フライス盤と割出盤をともに数値制御 (NC) できるように改造したものを組合せて歯切り装置とした。これを図7に示す。制御用インターフェース類、制御用ソフトなどは自作のものを用いた。工具は市販の半頂角 10° のテーパエンドミルを用いた。

5.4 歯当たり試験 塩化ビニールを母材として

図7 歯切り装置

図5 直交三軸動エンドミル歯切法での歯形誤差 (歯筋相当線を歯先に設定した場合)

図6 荒削り無効歯面のエンドミル歯切り歯形誤差

図8 試作ホイール歯面上の同時接触線に対応する歯当たり

図9 ホイール歯面の修正法の概要

図10 修正されたホイール歯面
(歯面着色部分は図9の $P_{ER}-P_{ER}$ 部分に対応)

ホイールを試作した。図8はこのホイールの歯当たりを示す。同時接触線が現れている。理論どおりの全面歯当たりが得られ、本歯切り法の有効性が確認できた。

6. ホイール歯面の修整

本歯切り法の自由度を生かせば精巧な歯形修整も可能であるが、簡単な歯形修整法の一つを示す。

図9に示すように、エンドミルを示す円すい断面の点 P_{ER} を適当に定め、これを中心に円すいを回転させて歯切り誤差とクラウニング量を加えた量を削る。

まず塩化ビニールの母材を用いて歯切りを行った。この結果を図10に示す。歯筋線付近の着色部分は図9の $P_{ER}-P_{ER}$ 部分である。クラウニング量は歯先、歯底で各々0.2 mmである。また歯筋方向にもクラウニングが加えてある。有効歯面の中央を中心に、入口側、出口側の両端で0.2 mmのクラウニングがつくように一次関数で与えてある。

以上の予備実験を踏まえて砲金のホイールの加工を行った。完成したホイールの歯当たり試験の結果を図11に示す。有効歯面の中央付近にいちばん強い歯当たりがあり、本修整法の有効性を確認することができた。

図11 歯筋歯形両方向に修正された歯面を持つ砲金ホイール

図12 修正されたホイール歯面 (CASE III)

本歯切り法では大きなねじれ角のホイールも容易に歯切りできる。図12に速比8/41のホイールの例を示す。

7. 結 言

エンドミルの切削能率の良さと制御の応答性を補う歯切り法において、工具運動の与え方が歯切り誤差に及ぼす影響を調べた。その結果、

(1) 工具の形や運動を歯面形状に適合させる効果は大きい、その適合が簡単に実現できるかの問題がある

(2) 工具を直交三軸方向に動かす方法では、歯先と歯底での歯切り誤差は無視できないが、歯切り創成回数を増やすことで、歯形修正を付加しながらこの問題を解決できる

ことなどがわかった。

文 献

- (1) 島地・ほか3名, 機論, 52-482, C (昭61), 2747.
- (2) 島地・ほか1名, 本論文集 1045 ページ.
- (3) 豊山, 機論, 28-196 (昭37), 1676.