任意歯形をもつ歯車と工具の設計・加工に関する研究*
(第2報, NC制御による砥石の整形とはずば歯車の成形研削)

石 橋 彰**, 吉 野 英 弘**

Design and Manufacture of Gear Cutting Tools and
Gears with an Arbitrary Profile
(2nd Report, Trueing of Wheel with NC Dresser and
Form Grinding of Helical Gears)

Akira ISHIBASHI and Hidehiro YOSHINO

By applying the theory in the 1st report, the authors proposed a method to calculate the exact profile of a form grinding wheel for finishing a helical gear with an arbitrary tooth profile. Using this method, they calculated the exact wheel profile which can produce an involute tooth profile with a tip relief at a transverse section of the involute helical gears. The wheel profile was generated by a single point diamond dresser using a universal NC milling machine with an attachment made by the authors. The tooth flank and root of test gears were ground at the same time to prevent occurrence of a notch which is apt to be produced at the boundary of ground and unground surfaces. The accuracy of the form-ground test gears was in the 0 class of JIS and their surface roughness was in the range of 0.5 to 1.0 μm R_{max} .

Key Words: Gear, Involute Profile, Form Grinding, NC Machine Tool, Tooth Tip Relief

1. 緒 言

第1報では, 任意の歯形をもつ歯車と工具の設計・加工のあらゆる場合に利用できる輪郭計算法の計算原理を提案し, その適用例として, 円弧歯形歯車用のホブ歯形の設計について報告した⁽¹⁾. 第2報では, この輪郭計算法の適用例として, はずば歯車を成形研削する場合について報告する.

歯車の成形研削は, 創成研削に比較して加工能率が高く, また各種の歯形や歯すじの修整に対応できる長所をもちながら, まだ十分活用されていない. その理由は, はずば歯車を成形研削するための砥石輪郭の計算, およびその砥石のツルーイング(整形)⁽²⁾に難点があるためと思われる. しかしながら, 最近のNC工作機械の高精度化, コンピュータ利用技術の進展, さらに電着CBN砥石の採用⁽³⁾にともない, 歯車の成形研削は今後, 大いに利用されるものと推察される.

本報では, 与えられた歯形をもつ歯車を成形研削するための砥石輪郭の計算手順を示すとともに, 具体例として, インボリュートはずば歯車の成形研削を取り

あげ, 砥石輪郭の計算過程で問題となる干渉などの影響について述べる. また, 実際にNC工作機械を用いて, 計算で求めた輪郭に砥石を整形して, 焼入れ硬化歯車を成形研削したので, その経過と研削した歯車の歯形精度などについても報告する.

2. 成形研削用砥石の輪郭

2.1 簡易的方法 はずば歯車の簡易成形研削は, はずば歯車のフライス切りと全く同様に扱うことができる. インボリュートはずば歯車をフライス切りで仕上げる場合は, 歯車の歯直角断面に平歯車(仮想平歯車)を導入して, その仮想平歯車の歯数に合う総形カッタ(インボリュート歯形)を用いるのが普通である⁽⁴⁾. 図1は, そのような総形カッタを製作して, 歯切りした歯車の正面歯形の誤差曲線を示している. このときの計算には, 後述する著者らの方法を利用し, 計算に用いた歯車は, 表1に示すものと同じである. 仮想平歯車の歯数は $N' = N / \cos^3 \beta = 16.64$, カッタ半径は $R_w = 60 \text{ mm}$, カッタ取付角は $\Gamma = 15^\circ (= \beta)$ として計算した. 歯先と歯元部が正規のインボリュート曲線(直線で表す)より大きく逃けているが, 一応安全側になっていることがわかる. 図2は, 歯数とねじれ角が変化した場合の誤差の全容を示している. 歯数が小

* 昭和61年11月3日 中国四国支部・九州支部合同大分地方講演会において講演, 原稿受付 昭和61年5月6日.

** 正員, 佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町1).

さいほど、またねじれ角が大きいほど、誤差は大きくなる傾向にある。

以上の計算例からわかるように、精度のよいはずば歯車を成形研削によって仕上げるには、簡易的方法が利用できない場合が多い。本研究で用いた試験歯車(表1)の場合も、簡易的方法が利用できない場合に相当する。本研究では、与えられた歯形の歯車を仕上げるための厳密な砥石輪郭を求めて、歯車を成形研削する方法を明らかにする。

2.2 著者らの方法 図3は、成形研削におけるワーク軸に取付けた被加工歯車と砥石軸に取付けた砥石車の関係、およびその座標軸系を示している。与えられた歯形をもつ薄板状の歯車をワーク軸に、整形前の砥石車を砥石軸に取付けて、両軸を所定の関係位置で相対運動させれば、砥石軸に求める輪郭をもつ砥石車を得ることができる。ただし、干渉が生じている場合があるので、与えられた元の歯車と同じ歯車が、求めた砥石車によって成形研削できるかどうかを確認しなければならない。両者が加工誤差に比べて十分の精度で一致することが確認されてはじめて、求めた砥石輪郭が使用できるものとなる。

図1 仮想平歯車方式による砥石輪郭を用いて成形研削される歯形(計算結果)

図2 はずば歯車の歯直角断面歯形をインボリュート曲線とした場合の正面歯形の誤差

著者らの提案した輪郭計算法⁽¹⁾は、歯形の創成過程をほぼ完全にシミュレートしており、成形研削に用いる砥石輪郭の計算にも利用できる。

2.3 座標変換式 与えられた歯車歯形から砥石輪郭を求める場合について述べる。与えられた歯形上の点を $Q(X, Y)$ 、ワーク軸に垂直な平面と砥石軸のなす角(砥石取付角)を Γ 、ワーク軸と砥石軸の距離を a とすれば、点 Q に対応する砥石軸上の回転しない座標系で表される点 $P'(u, v, w)$ は、次式で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} u &= X \cos \Gamma \cos \phi + Y \cos \Gamma \sin \phi - \xi \sin \Gamma \\ v &= X \sin \phi - Y \cos \phi + a \\ w &= X \sin \Gamma \cos \phi + Y \sin \Gamma \sin \phi + \xi \cos \Gamma \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\phi = 2\pi\xi/L$ である。 ξ は砥石と歯車の相対運動位置を表すパラメータで、歯車の軸方向(Z 方向)の移動量を与える。 L は歯車の軸方向リードで、値が正のとき右ねじれ歯車であることを意味する。

点 P を砥石軸の回りに回転させれば、砥石軸方向断面上の点 $P(x, y)$ が得られる。

$$\left. \begin{aligned} x &= u \\ y &= \sqrt{v^2 + w^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

歯形を表す $Q(X, Y)$ のすべての点について、 ξ を小さい間隔で変化させて $P(x, y)$ を計算し、得られた多数の点を x - y 平面上に描けば、その点群の最も外側の輪郭を表す点列が求める砥石輪郭となる。この砥石輪郭を表す点列を高精度で能率よく求めるために、本研究の第1報で提案した輪郭計算法を利用する。なお、この方法を利用すれば、干渉が生じる場合でも砥石輪郭を計算することができる。

上記とは逆に、既知の輪郭をもつ砥石車によって成形研削される歯車の歯形を求める場合は、砥石輪郭上

図3 歯車の成形研削の計算に用いる座標軸系

の点 $P(x, y)$ から歯車の正面断面上の点 $Q(X, Y)$ を求める式を用いればよい(計算式は省略)。

2・4 数値計算例 表1に数値計算に用いたインボリュートはすば歯車の諸元を示す。具体例としてインボリュート歯車を選んだ理由は、計算誤差の表示や研削歯車の測定に従来の方法が利用でき、計算結果や研削精度の評価が容易なためである。

計算に用いた歯車の歯形形状を図4に示す。歯形は左右対称であるので、片歯面に相当する部分について計算する。インボリュート曲線と歯底の直線部は、丸み半径 $r_f = 0.25m_n$ の円弧で滑らかに結ばれている。歯底部の形状を除いて、計算に用いた歯形が表1に示した歯車のものと異なっている点は、歯車を成形研削するとき、歯溝への砥石の挿入が容易にできるように、計算に用いた歯車の歯厚を1mmだけ厚くした(砥石をうすくした)ことと、歯丈を標準の歯丈より少し高

表1 数値計算と成形研削に用いた試験歯車の諸元

Normal module	m_n mm	5
Number of teeth	N	15
Helix angle	β	$15^\circ R$
Pitch circle diameter	d mm	77.65
Outside diameter	d_k mm	87.6
Face width	b mm	15, 50

図4 計算に用いたはすば歯車の正面断面形状

くしたことである。

歯形形状は、約500個の点で表されており、各点の間隔は約0.026mmである。砥石軸とワーク軸の距離は、用いる砥石車の半径によって変化するが、以下の計算例では、砥石半径を $R_w = 60$ mmとした場合で、 $a = 96.229$ mmのものを主に示す。相対運動の位置を表す計算間隔は、 $\Delta\xi = 0.25$ mmとして計算した。

砥石の取付角を歯車のねじれ角 β と同じ $\Gamma = 15^\circ$ として計算した場合の砥石輪郭の計算結果を図5に示す。砥石の輪郭曲線は約500個の点で表されている。求めた砥石輪郭が使用できるかどうかは、その砥石車を用いて成形研削される歯車の歯形を逆行程で計算して(検証歯形)、図4に示す与えられた元の歯形と比較して判断しなければならない。

図6は、逆行程による検証歯形(実線)と元の歯形(破線)を同一紙面上に拡大して示している。歯元のすみ肉部を除いて、両歯形はほぼ完全に一致している。図7は、図6の矢印で示す歯元部の食違いの原因を明らかにするために、砥石の取付角を変化させて計算した場合の両歯形のすみ肉部を拡大して示している。取付角が小さすぎても、大きすぎても食違いが大きくなっており、干渉の発生が原因であることがわかる。図

図6 計算で求めた輪郭をもつ砥石車で研削される歯形(検証歯形)と与えられた歯形の比較

図5 計算によって求めた砥石車の輪郭

図7 干渉に及ぼす砥石取付角の影響

8は、逆行程による検証歯形をインポリュート歯形の誤差曲線として表している。砥石取付角 $\Gamma=14^\circ$ の最も良好な場合でも、わずかに計算誤差が観察される。砥石輪郭を求めた段階では、この誤差は半分になると予想されるので、普通のはずば歯車の研削に用いる砥石車の輪郭としては、十分な計算精度であると思う。なお、砥石取付角 $\Gamma=14^\circ$ は、ピッチ円上ねじれ角 $\beta=15^\circ$ より小さく、歯元円上ねじれ角の約 13° よりも大きくなっている。

計算に要した時間は、佐賀大学の中形計算機(FACOM M-150 F)を用いて、歯車歯形から砥石輪郭を求める場合で約20sであった。

3. NC制御による砥石の整形

数値計算の結果、砥石の取付角を $\Gamma=14^\circ$ とした場合に、与えられた元の歯形に最も近い歯形の歯車が研削できることがわかったので、以下に述べる砥石の整形、歯車の研削試験では、すべて $\Gamma=14^\circ$ とした。

計算で求めた砥石の輪郭曲線は、関数の形で表せない自由な形をしているので、砥石の整形はNC工作機械に頼らざるを得ない。本研究で用いたM社製のNCフライス盤は、回転テーブル付の4軸制御のもので、同時に3軸まで制御することができる。

砥石を正確に整形するには、整形に用いる単石ダイヤモンドドレスサ先端の形状が整形精度に影響しないように、ドレスサ先端を常に輪郭曲線の法線方向に向けておく必要がある⁽⁵⁾。一方、計算で求めた砥石輪郭は点列として表されている。NC装置の直線補間機能を用いて各点の間をつなぐとすれば、すべての点の座標値をNC装置に与えなければならない。また、この方法では、輪郭曲線が折れ線として表されるので、砥石を滑らかに整形することは困難である。

砥石輪郭を連続した数個の円弧で近似できれば、NC装置の円弧補間機能が利用できるのので、NC装置

に与えるデータ数が著しく少なくなる。また、このようにすれば、制御軸のうちの2軸を用いて砥石輪郭を円弧補間で表し、1軸をドレスサの方向制御に利用できるのので、極めて好都合である。図9は、研削試験に用いた砥石の形状を示している。計算で求めた砥石輪郭を連続した円弧列に近似するとき、その最大許容誤差を $1\mu\text{m}$ として計算したところ、歯の片面に相当する部分を5個の円弧で表すことができた。ただし、研削時に砥石の外径部が歯車の歯溝の底に接触しないように、砥石先端の丸み半径を計算で求めた砥石輪郭のものより少し小さくした(図14では歯底も研削)。

図10に製作した砥石整形装置の主要部を示す。ドレスサの方向制御には、回転テーブル軸(ワーク軸)を用いており、ドレスサの向きが変化してもドレスサ先端の位置は移動しないようになっている。

砥石整形時のドレスサの切込みは、NCフライス盤の工具径補正機能を利用した。1回当たりの整形量は、

図9 砥石輪郭の円弧補間とドレスサによる整形

図8 歯形精度に及ぼす砥石取付角の影響(計算結果)

図10 製作した砥石整形装置の主要部

粗研削用整形の場合で $10\ \mu\text{m}$ 、仕上げ研削用の場合は $2\ \mu\text{m}$ とし、それぞれ5回ずつ行った。使用した砥石は、WA 80 J で砥石周速は約 $14\ \text{m/s}$ 、整形速度は $1\ \text{m/min}$ とした。

4. はすば歯車の成形研削試験

4.1 研削条件と研削試験結果 図 11 に NC フライス盤を用いて試験歯車を成形研削している様子を示す。試験歯車(諸元は表 1 参照)は、SCM 440 を用いてホブ切り後、焼入れ焼戻ししてブリネル硬度 $H_B \approx 420$ にして使用した。切込み量はワーク軸(回転テーブル軸)を回転して与えた。切込み量は、粗および仕上げ研削で、それぞれ $7, 3.5\ \mu\text{m}$ とし、最後にスパークアウトさせた。試験歯車の送り速度は、 $20\ \text{m/min}$ とした。研削は、主に乾式で行ったが、水溶性の研削油(ソリューションタイプ)も一部の試験で使用した。

図 12 に、乾式で成形研削した試験歯車の歯形と歯すじの測定例を示す。ピッチ精度は、隣接の最大誤差が $1.8\ \mu\text{m}$ 、累積の最大誤差が $4.5\ \mu\text{m}$ であった。これらの値は、いずれも JIS 0 級に入っている。また、研削歯面の粗さは、歯形および歯すじ方向とも $R_{\text{max}} = 0.5 \sim 1\ \mu\text{m}$ であった。NC 工作機械にとっては、イン

ポリウー歯車も一つのスペシャルケースと考えることができるので、他の種類の歯形をもつ歯車を成形研削する場合においても、同等の精度が確保できると予想される。

4.2 成形研削の応用例 図 13 は、表 1 に示す試験歯車に、歯先で $30\ \mu\text{m}$ の歯形修整を行った場合の計算と研削試験の結果を示している。与えられた元の歯形、計算で求めた輪郭をもつ砥石によって成形研削される歯形(検証歯形)および実際に研削した歯車の歯形ともよく一致している。

図 14 は、歯車の歯面と歯溝の底を同時にクリープフィードで成形研削した歯車を示している。送り速度は $2\ \text{m/min}$ 、湿式で研削した。歯面と歯底は滑らかにつながっている。このようにすれば、歯元に研削による段(切欠となる)が全く生じないので、歯の曲げ強度の低下が防止できる。この場合の砥石輪郭は、歯底の仕上げしろの分だけ深く切り込んだホブによって歯切りされる歯車の歯形を計算して(第 1 報参照)、その歯車と同じ歯車が成形研削できるように決定した。図 15 は、ホブ切りされる歯車の歯形と計算で求めた輪郭の砥石車によって研削される歯形(検証歯形)の違いを示している。両歯形の差は、法線方向の誤差として拡大

図 11 試験歯車の成形研削と砥石整形装置

図 13 修整歯形をもつはすば歯車の成形研削
(歯先で $30\ \mu\text{m}$ 修整、修整歯丈 $3\ \text{mm}$)

図 12 研削した試験歯車の歯形と歯すじの精度

図 14 歯面と歯溝の底を同時に研削した歯車 ($m_n = 5$)

図 15 要求される歯形と成形研削される歯形 (検証歯形) の比較

図 16 歯面と歯溝の底を同時に研削できる砥石車の輪郭

して示している。ホブ切りした歯形の計算に用いたホブは、軸方向断面でインボリュートヘリコイドの切れ刃輪郭をもち、切れ刃溝数を $K=30$ とした。図 16 に成形研削に用いた砥石輪郭を示す。砥石輪郭は、最大許容誤差を $2\mu\text{m}$ としたとき、9 個の連続した円弧で近似することができた。

5. 考 察

はすば歯車を成形研削によって仕上げる場合は、砥石の大きさに応じて、用いる砥石輪郭は変化する。砥石車は、整形の繰返しによって小さくなるので、理論的には絶えず砥石輪郭を求める計算が必要になる。図 17 は、半径の異なる砥石車を同じ輪郭に整形して、試験歯車を研削する場合の歯形誤差を示している。この計算では、砥石半径の変化に合わせて、研削時の砥石軸とワーク軸の距離も変化させた ($\Delta R_w = \Delta a$)。砥石車の半径が $\Delta R_w = \pm 0.5\text{ mm}$ 程度変化しても、研削される歯車の歯形精度にはほとんど影響しない。したがって、

図 17 歯形誤差に及ぼす砥石半径の影響 (計算結果)

砥石半径の変化に応じて、有限個の砥石輪郭を求めておけばよいことになる。

6. 結 言

本研究の第 1 報で提案した歯車と工具の輪郭計算法を歯車の成形研削に適用して次の結果を得た。

(1) 提案した輪郭計算法がはすば歯車の成形研削の場合についても、実用上十分な精度で砥石輪郭の計算に利用できることを示した。

(2) 歯形の創成過程において干渉が生じることを事前に知り、その干渉を小さくするための砥石軸とワーク軸の関係位置を求めるのに、著者らの輪郭計算法が有効であることを示した。

(3) 砥石車を NC 制御によって整形する場合に、砥石輪郭を連続した円弧列に近似することが重要であることを示した。

(4) NC フライス盤を用いて、インボリュートのはすば歯車を成形研削した結果、JIS 0 級の歯車を得ることができた。また、修整歯形をもつ歯車の研削、さらに歯面と歯溝底の同時研削を行い、NC 制御による歯車の成形研削が、他の種類の歯形をもつ歯車にも十分適用可能であることを示した。

終わりに、砥石整形装置の製作などご援助いただいた佐賀大学理工学部生産機械工学科技官、伊藤勝美氏および理工学部実習工場のかたがたに感謝します。

文 献

- (1) 石橋・吉野, 機論, 53-487, C (昭 62), 887.
- (2) 津田・ほか 2 名, 精密機械, 40-11 (昭 49), 1000.
- (3) Kimmet, G. and Dodd, H., *AGMA Tech. Paper*, No. 84-FTM 6, (1984), 10.
- (4) 歯車便覧編集委員会編, 歯車便覧, 改訂版 (昭 44), 653, 日刊工業新聞社.
- (5) 相浦・ほか 5 名, 機論, 50-452, C (昭 59), 678.

討 論

〔質問〕 石川二郎〔東洋精密造機㈱〕

歯車の研削に関するすばらしい研究を従来から発表されかねてから敬服していた。ヨーロッパでは歯車研削盤の開発が盛んだが我が国では少ないように思うので大変有難く思う。成形研削は昔やったことがあるが(1)と石が全面あたるので研削焼けの問題、(2)研削に要する時間のご質問をさせていただく。また遊星歯車装置を生産しているが、内歯車の研削の必要性を痛感している。成形によった平・はすば内歯車の高精度研削が可能となればガスタービン用減速機としても極めて高い性能の減速機が期待されるので、引き続いて内歯車の研削をお願いする。

〔回答〕 本研究では、著者らが提案した歯形と工具の輪郭計算法をNC制御を利用した歯車の成形研削に適用して、本方法の実用性と成形研削した歯車の

仕上精度を調べることに主点をおいている。したがって、歯車を高能率で成形研削するために必要な条件を求める組織的な実験は行っていない。しかし、本研究で用いた試験歯車の研削条件の下では、歯面の研削焼けは起こっていない。

研削仕上げに要する時間は、試験歯車($m_n=5$, $z=15$, $\beta=15^\circ$, $b=50$)を湿式による粗研削を1回(切込み $\delta=0.1$ mm, 送り $f=2$ m/min), 仕上げ研削を片歯面2回の計4回($\delta=3.5$ μ m, $f=20$ m/min)とすると、粗および仕上ドレッシングに要する時間を含めて約7 minになる。

本研究を基にした成形による平・はすば内歯車の高精度研削仕上げは可能なので、今後研究したいと思っている。