砥石整形装置付き CNC 総形歯車研削盤の開発*

池野 一 広** 丸井 森 俊*** 吉野 英 弘†

Development of CNC Gear Grinding Machine with Truing Attachment

Kazuhiro IKENO, Moritoshi MARUI and Hidehiro YOSHINO

To supply low-cost and high-precision ground gears, the CNC gear form-grinding machine with the truing attachment was developed. The grinding machine can finish spur and helical gears with an arbitrary profile and with a three-dimensionally modified tooth surface by using the supporting software developed at the same time. The structure of the grinding machine was determined so that positioning errors between the grinding wheel and work gear do not affect profile errors of ground gears, and that number of control axes becomes as small as possible. The grinding wheel is trued accurately on the machine by a single-point diamond dresser, of which the direction is controlled corresponding to the normal direction of the grinding-wheel profile. The accuracy of the gears finished on the grinding machine were better than 0 class of JIS and the surface roughness of the ground gears were lower than $1 \mu\text{mR}_{\text{max}}$.

Key words : gear, form grinding, grinding machine, CNC control, truing attachment, diamond dresser, supporting software

1. 緒 言

歯車装置の高速化, 伝達能力の向上, 振動・騒音の低減に対する要求が高まり, 高精度で安価な研削歯車が求められている。とくに, 振動・騒音の低減は重要な課題となりつつあり, 今後は, 歯や歯車軸などの弾性変形を考慮して歯面を3次元的に修整した研削歯車が求められるようになると思われる。

総形方式(成形方式ともいう)による歯車の研削は, 任意の歯形をもつ歯車や3次元的な修整歯面をもつ歯車が研削できる¹⁾, 面粗さの向上が期待できるなど次世代の歯車研削法として注目されている。

初期の総形歯車研削盤²⁾は, 形板を用いて砥石を整形していたために, ワークの諸元に応じて高精度の形板を多数用意する必要があるなどの問題があった。最近になって, 数値制御(CNC)によって砥石整形を行う方式の歯車研削盤が開発され始めている³⁾。しかし, 砥石整形の高精度化, 軸配置の最適化, 制御軸数の節減等を十分に考慮した歯車研削盤は開発されていないようである。

今回, これらの点にとくに注意して, 砥石整形装置付きの総形歯車研削盤とその支援ソフトウェアを開発した。以下, その開発経過と開発した歯車研削盤による歯車の研削例について報告する。図1に, 開発した歯車研削盤(FGS-30 N)の外観と主要部を示す。

2. 歯車の総形研削

2.1 総形研削の原理

総形方式による歯車の研削は, 図2に示すように歯溝の形状に合った輪郭の砥石をワークのねじ線に沿って移動させることによって, 1行程で左右の歯面を同時に, もしくは片歯面ずつを2行程で仕上げる。歯車の全歯を仕上げるために研削運動の間に歯の割出しを行う必要がある。機構的には歯車のフライス

Fig. 1 General view and main parts of the developed gear-grinding machine

Fig. 2 Gear grinding by form-grinding method

* 原稿受付 平成5年5月6日

** 学生会員 (株)唐津鐵工所 (唐津市ニタ子3-12-41)

*** 正会員 (株)唐津鐵工所

† 正会員 佐賀大学理工学部 (佐賀市本庄町1)

Fig. 3 Effects of positioning errors between work gear and grinding wheel on tooth profile of gears to be ground

Table 1 Specifications of gear and grinding wheel used for profile calculation

Gear	Normal module	3 mm
	Number of teeth	20
	Pressure angle	20°
	Helix angle	20° RH
	Face width	30 mm
Grinding wheel	Radius	125 mm
	Setting angle	20°

切りと同一であり、創成方式のように砥石を仮想ラックとみなしたかみ合い運動を利用しないために、研削盤の構造は比較的簡単になる。

歯車の総形研削には、整形が不要な超砥粒砥石（CBN の電着砥石など）を用いる方法と、整形の容易なアルミナ系の砥石（WA 砥石など）を用いる方法がある。前者は研削能率が高く、同じ諸元の研削歯車を量産する場合には効果的な方法であるが、多種少量の歯車を低コストで研削する場合には後者が適している。今回は、後者の方式の歯車研削盤を開発した。

2.2 総形研削の問題点

これまで、歯車の総形研削が普及しなかった理由は3つ考えられる。1つは、はすば歯車を研削する場合の砥石輪郭の計算方法が確立していなかったこと、2つは、自由曲線となる砥石輪郭の高精度整形が困難であったことである。ところが、電子計算機の出現と計算技術の進歩によって砥石の輪郭計算が可能になる一方、数値制御技術の進展によって CNC による砥石の整形が可能になるなど、最近になってこれら2つの問題点は克服できる見通しが得られた⁴⁾。

歯車の総形研削が普及しなかった第3の理由は、砥石とワークの位置誤差が研削した歯車の歯形精度に著しく影響を与えるということである⁵⁾。位置誤差が生じる原因には、研削盤製作時の加工誤差や組立誤差、各軸の位置決め誤差、砥石の取付誤差および砥石軸の熱変形などが考えられる。図3は、表1に示す諸元の歯車を、故意に位置誤差を与えて研削した場合に得られる歯形を示す。ただし、計算には正確に整形された砥石を使用した。計算例の歯車を JIS 0 級（歯形誤差：4 μm）に仕上げるためには、砥石とワークの中心距離誤差 Δa を 15 μm、砥石の軸方向位置誤差 Δx を 34 μm 以内に抑える必要があることがわかる。

3. 開発経過

今回開発した歯車研削盤では、以上に述べたことを考慮して、次のような方針のもとに開発を進めた。

3.1 砥石の高精度整形

従来の CNC 総形研削盤を砥石の整形方法によって分類すると、ドレッサの方向制御を行う方式のもの⁶⁾と行わない方式のものに分けられる。砥石整形時にドレッサの方向を制御するこ

Fig. 4 Truing of grinding wheel profile by a single point diamond dresser

Fig. 5 View of the truing attachment

とは、ドレッサの形状誤差が整形精度に及ぼす影響を小さくする効果がある⁷⁾。しかし、構造が複雑になることを避けるために方向制御を行わずに、摩耗の少ないロータリッドレッサを用いている研削盤も多い³⁾。この場合は、ロータリッドレッサの角部の形状誤差に応じて砥石の整形経路を複雑に修正する必要がある。

開発した歯車研削盤では、砥石の整形に方向制御式の単石ドレッサを用い、図4に示すように、整形中にドレッサが常に砥石輪郭の法線方向を向くようにした。図5は、開発した砥石整形装置による砥石の整形状態を示す。ドレッサは水平面から15°だけ下向きに傾けて取り付け、ドレッサ自身を必要に応じて自動的に回転させるようにした。これによって、ドレッサの先端は、鉛筆を削る要領で常に円すい状に保たれる。

一方、この方式では、摩耗したドレッサを用いて砥石を整形すると、得られる砥石は理論上の輪郭を摩耗量だけ法線方向にオフセットした形状になる。この場合、ドレッサの摩耗は研削歯車の歯厚に影響を与えるが、歯形精度にはほとんど影響を与えない。開発した歯車研削盤では、正確な歯厚をもつ歯車を研削するために適宜ドレッサの摩耗量を測定し、NC 装置の工具径補正機能とマクロ機能により摩耗量分だけドレッサを自動的にオフセットできるようにした。

3.2 位置誤差の低減

歯形に悪影響を及ぼす位置誤差を生じさせる原因の中で、とくに温度変化に伴う熱変形を最小限に抑えることが重要である。熱変形の防止対策としては、温度制御された冷却油を大量に循環させる方法や熱膨張率の小さな材料を用いる方法などが

ある。しかし、それらは一般に研削盤を高価なものにしてしまう。

開発した歯車研削盤では、次に示すように軸配置を最適化することによって熱変形の悪影響を防止する方法を採用した。歯車の綫形研削においては砥石整形装置の設置場所も研削歯車の歯形精度に影響を与える。従来の綫形研削盤では、砥石台上に砥石整形装置を設置している場合が多く、ボールスクリューや砥石軸の熱変形によって生じた位置誤差および砥石の傾け角誤差などが、研削した歯車の歯形精度に悪影響を及ぼすといわれていた。開発した歯車研削盤では、砥石整形装置を主軸台側面に取り付け、ワーク側から砥石を整形するような軸配置を採用した。このようにすれば、熱変形などによって砥石とワークの中心距離や砥石の軸方向位置に誤差が生じて、砥石を整形するたびに誤差が自動的に相殺されることになる。軸配置の最適化によって、位置誤差に鈍感で高精度な歯車研削盤を比較的容易に実現することが可能になった。

3.3 制御軸数の節減

単石ドレッサによる砥石の整形には、 X_d, Y_d, A_d の 3 軸制御が必要である (図 4)。一方、歯車の研削には、 X_g, Y_g, Z_g, A_g, B_g の 5 軸制御が必要である (図 2)。したがって、砥石整形装置付き歯車研削盤では、基本的には合計 8 軸の制御軸が必要になる。制御軸数の増大は、部品点数の増大のみならず、構造の複雑化や剛性の低下をもたらす結果として研削歯車の精度を低下させることになる。

開発した歯車研削盤では、3.2 節で述べた軸配置を採用したために、制御軸数の大幅な節減を図ることができた。すなわち、砥石の整形における X_d, Y_d 軸と歯車の研削における X_g, Y_g 軸を共有させることによって 2 軸を省略し、さらに砥石の旋回中心線がワーク軸の軸心を通る構造 (図 7 参照) にすることによって Z_g 軸も省略することができた。つまり、8 軸のうち 3 軸を省略して、5 軸制御の高精度歯車研削盤を製作することが可能となった。

3.4 構造の基本型

5 軸制御の歯車研削盤を設計する場合、その構造は、図 6 に示すように 4 種類が考えられる。図 6 (a) は、ホブ盤などにしばしば採用されており、ベッド上に 2 つのコラムが向かい合う構造である。片側のコラムに主軸台と心押し台が固定され、ワークを縦に支持する。反対側のコラムに配置された砥石台は、ワークの半径方向と軸方向に移動して歯車の研削および砥石の整形を行う。ワークの自重による軸のたわみがなく、主軸台が大きくできるために大径歯車の研削に適している。

図 6 (b)~(d) はワークを横に支持する構造で、軸付き歯車やウォームなどの長尺物の研削に適している。図 6 (b) は、ベッド上に門形のコラムとワークテーブルをもち、コラムには砥石台が配置されワークの半径方向に移動する。ワークテーブルには、主軸台と心押し台が固定されワークの軸方向に移動する。図 6 (c) は、円筒研削盤などにしばしば採用されている構造で、ベッド上にワークテーブルと砥石台が配置される。ワークテーブルには、主軸台と心押し台が固定されワークの軸方向に移動する。砥石台はワークの半径方向に移動する。図 6 (d) は、往復台と砥石台を 2 段に重ねた構造で、ベッド上の往復台はワークの軸方向に、往復台上の砥石台はワークの半径方向に移動する。主軸台と心押し台は、ベッド上に直接固定される。構造としては最もコンパクトな構造となる。

3.5 採用した構造

Fig. 6 Fundamental structures of gear-grinding machine with 5-controlled axes

Table 2 Specifications of the developed gear-grinding machine

Max. gear diameter	300 mm
Min./max. module	1-8 mm
Helix angle	$\pm 45^\circ$
Distance between centers	550 mm
Grinding-wheel diameter	200-300 mm

開発した歯車研削盤では、図 6 にあげた 4 種類の構造のうち、(1) 省スペース設計が可能、(2) 砥石の整形を水平面内で行うためにカウンタバランス装置が不要、(3) 小径、長尺の歯車研削に適する、(4) ワークの自動搬入・搬出への展開が容易であるなどの理由により図 6 (d) の 2 段重ね構造を採用した。

表 2 に開発した歯車研削盤の主な仕様を、図 7 にその構造の概念図を示す。ベッドは、剛性および吸振性を重視して鋳鉄一体構造とした。往復台は V-平、砥石台は V-V 案内面とし、位置誤差の原因である組立誤差を最小限に抑えるためにきざげ

Fig. 7 Structures of the developed gear-grinding machine

Fig. 8 Flow chart of the supporting software developed for form-grinding of gears

処理を行った。

砥石の整形は砥石軸を水平にした状態（図7参照）で行い、歯車の研削は歯車のねじれ角に合わせて砥石台（A軸）を回転させて行う。たとえば、平歯車を研削する場合は、砥石台を反時計方向に90°回転させて、両センタに支持されたワークを研削することになる。

4. 支援ソフトウェア

はすば歯車を綫形研削で仕上げる場合に使用すべき砥石の輪郭は、歯車の諸元だけでなく砥石の外径によって変化する。一方、砥石の外径は整形のたびに少しずつ小さくなるので、厳密にはその都度（実用的には数mmおきに）砥石輪郭を計算して砥石の整形に使用するNCプログラムを作成しなければならない。したがって、この種の歯車研削盤では、自動プログラミング機能を備えた支援ソフトウェアが必要不可欠である。

砥石輪郭の計算法には、いくつかの方法⁹⁾が提案されているが、今回は、計算が高速で干渉チェックも同時に行うことのできる要素除去法⁹⁾を用いて対話方式の支援ソフトウェアを開発した。支援ソフトウェアでは、砥石の整形、歯車の研削を含む一連のNCプログラムを初心者でも簡単に作成することができる。図8に、開発した支援ソフトウェアの流れを示す。

要素除去法では、歯車（ドレスギア）による砥石の除去過程をそのままシミュレートすることによって砥石輪郭を求めているために、インボリュート以外の任意の歯形をもつ歯車を研削

Table 3 Dimensions of test gear, grinding conditions, etc.

Work gear	Normal module		3 mm
	Number of teeth		20
	Pressure angle		20°
	Helix angle		20° RH
	Face width		30 mm
	Material		SCM 415
	Hardness		Hs 80
	Grinding stock (infeed)		0.3 mm
Grinding wheel	Radius		140 mm
	Setting angle		20°
	Specification		WA 80 J
Truing conditions	Infeed (final)		0.01 mm
	Feed rate		200 mm/min
	Wheel revolution		2 000 rpm
Grinding conditions	Rough	Infeed	0.25 mm
		Feed rate	1 000 mm/min
		Wheel revolution	2 000 rpm
	Finish	Infeed	0.05 mm
		Feed rate	1 000 mm/min
		Wheel revolution	2 000 rpm
	Grinding time	Truing	2.0 min
Rough grinding		2.5 min	
Finishing		2.5 min	
Total		7.0 min

Fig. 9 Accuracies of test gear finished on the developed gear-grinding machine

する場合にも使用できる。ただし、干渉が生じない条件の下で研削する必要がある。干渉の有無は、得られた輪郭の砥石を用いて歯車を研削した場合の歯形を計算し、最初に与えた歯形と比較することによって判断できる。両者が完全に一致した場合は干渉は生じない。しかし、両者が異なる場合には干渉が生じるので、砥石の外径や取付角などを変更して、干渉の生じない条件を探し出す必要がある。

Fig. 10 Changes in tooth profiles of gears finished at 30-min intervals

5. 研削例

表3は、研削試験に用いた歯車の諸元や研削条件などを、図9は、開発した歯車研削盤で研削したインボリュートはすば歯車の精度の測定結果を示す。加工精度を明確に示すために、歯形修整、歯筋修整は行っていない。研削した歯車の精度はJIS0級以上であった。研削に要した時間は、砥石の整形に2分、荒研削に2分30秒、仕上研削に2分30秒の計7分であった。また、砥石整形および歯車研削のプログラムの作成には、32ビットのパソコンを用いて約2分を要した。

図10(a)～(d)は、表3に示す歯車をコールドスタートから30分ごとに1歯ずつ研削した場合の歯形変化を示す。ただし、砥石の整形は研削前に一度だけ行い、次の歯を研削するまでの時間は空運転を行った。空運転は、砥石とワークが接触しないように砥石台を1mm後退させた以外は、通常の研削と同一にした。図10(e)は、図10(d)の研削後に再度砥石整形を行って研削した場合の歯形である。図10(b)～(d)では、熱変形によって生じた位置誤差に起因する歯形誤差が表れている。しかし、図10(e)では、図10(a)と同じ正確な歯形が得られており、熱変形によって生じた位置誤差が砥石の整形によって相殺され、採用した軸配置が効果的に作用していることがわかる。図11は、開発した歯車研削盤による各種歯車の研削例を示す。

6. 結 言

以上をまとめると次のようになる。

- (1) 高精度の歯車を低コストで研削するために、綫形方式による歯車研削盤を開発した。開発した歯車研削盤では、砥石整形装置を主軸台側面に取り付けワーク側から砥石を整形する位置誤差に鈍感な軸配置を採用し、さらに制御軸数を節減して5軸制御の高剛性・高精度歯車研削盤を実現した。
- (2) 砥石の整形には、方向制御方式の単石ドレッサを使用し、ドレッサの自動回転とドレッサ摩耗の自動補正によっ

Fig. 11 Sample gears finished on the developed gear-grinding machine

て、長時間にわたる砥石の高精度整形を可能にした。

- (3) 開発した歯車研削盤で使用するNCプログラムを作成するために、対話方式による支援ソフトウェア群を開発した。
- (4) 開発した歯車研削盤で研削したインボリュートはすば歯車の精度は、JIS0級以上であった。
- (5) 開発した歯車研削盤は、任意の歯形や3次元的な修整歯面をもつ歯車の研削ができるなど、多様化が予想される今後の歯車にも柔軟に対応することができる。

参 考 文 献

- 1) 吉野英弘, 池野一広, 江副 寛: はすば歯車の3次元歯面修整に関する研究——任意の修整歯面をもつはすば歯車の成形研削, 日本機械学会講演論文集C編, 930, 9 (1993) 473.
- 2) 歯車便覧編集委員会: 歯車便覧, 日刊工業新聞社, (1962) 849.
- 3) たとえば, opal 420型 CNC 歯車研削盤カタログ, クリッゲンベルグ社.
- 4) 吉野英弘, 石橋 彰: 任意歯形をもつ歯車と工具の設計・加工に関する研究(第4報)——NC工具・歯車研削盤の試作とその応用例, 日本機械学会論文集C編, 55, 514 (1989) 1473.
- 5) 吉野英弘, 池野一広: 歯車の成形研削における誤差補正について, 日本機械学会論文集C編, 57, 543 (1991) 246.
- 6) 津田展宏, 石川二郎, 福田康正: 歯車の成形研削に関する研究(第2報)——円弧基準方式砥石整形機構, 精密機械, 40, 11 (1974) 1000.
- 7) 石橋 彰, 吉野英弘: 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すば歯車の成形研削, 日本機械学会論文集C編, 53, 487 (1987) 894.
- 8) たとえば, 西田知照, 小林洋一, 扇谷保彦, 塚本尚久: 成形研削用砥石輪郭の計算方法(第1報)——歯車研削用砥石と干渉防止, 精密工学会誌, 58, 4 (1992) 628.
- 9) 石橋 彰, 吉野英弘: 任意歯形をもつ歯車と工具の設計・加工に関する研究(第1報)——歯形輪郭の計算原理とホブの歯形設計, 日本機械学会論文集C編, 53, 487 (1987) 887.