総形ドレッシングを要しないコンピュータ支援めねじ研削*

鍵和田 忠男^{*1}, 原 田 宏 幸^{*1}
今 田 亮 祐^{*2}, 飯 田 重 幸^{*3}

Computer-Aided Female Screw Grinding without Form Dressing

Tadao KAGIWADA^{*4}, Hiroyuki HARADA,
Ryosuke IMADA and Shigeyuki IIDA^{*4} Hokkaido University, Graduate school of Engineering, N-13 W-8, Kita-ku Sapporo,
Hokkaido, 060-8628 Japan

Based on the present investigation, a computer-aided female screw grinding method without the form dressing process is proposed, in which a standard-shaped grinding wheel independent of the final helicoid is used. The method uses a simple conical or plain wheel, without limitations on diameter and base angle. The wheel axis is set three-dimensionally at the computed optimum angle of inclination comprising the tilt and swivel angle components of the planned helicoid and wheel. The optimum angle of inclination is determined through simulation of the grinding process and an investigation of the optimum angle of inclination that will give the minimum geometrical error. Through the aid of a computer assuming several geometrical shape of grinding wheel and generation experiments, it is shown that the present female screw generation method is effective and the generated female screw is more accurate than that obtained by normal female screw grinding method.

Key Words: Grinding, CAM, Generation Motion, Dressing, Female Screw Generation, Form Grinding, Form Dressing, Simulation, Optimization

1. 緒 言

めねじ研削においては通常は総形研削が用いられる。そこでは砥石軸は目的とするねじのリード角に等しい傾き角に設定され、まためねじの圧力角に対応した総形砥石が用いられる。めねじ研削に用いられるねじ研削盤は専用のドレッサを有しているが、総形ドレッシングによって目的のねじ形状を得るには多くの手間を要する。

本研究においては、めねじのねじ面を創成するために、総形ドレッシング過程を必要とせず、目的のねじ面形状とは無関係な普通形状の砥石を用いることによる、コンピュータ支援めねじ研削法を開発する。本研削法においては、直径や底角に制限を受けない単純な円すい形または平行砥石が用いられる。砥石軸は傾き角と旋回角とからなる目的めねじ形状と使用砥石形状に対応したコンピュータ支援による最適砥石軸角に、三次元的に設定される。最適砥石軸角は研削過程のシ

ミュレーションと、最小の形状誤差を与える最適砥石軸角の探索によって決定される。本研削法はおねじの形状創成において大変有用であることを既報⁽¹⁾⁽²⁾において示した。本報では、おねじとは幾何学的な条件の異なるめねじに対して同手法の適用を試み、その有効性を検討する。

2. 創成法と創成装置

図1は研削装置の模式図であり、図2は旋盤に研削ヘッドを装着して構成した研削装置の写真である。研削砥石は単純な円すい形または平行砥石であり、図1は平行砥石を想定して描かれている。砥石軸 z_s は傾

Fig. 1 Diagram of grinding configuration

* 原稿受付 1998年8月21日。

^{*1} 正員, 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)。

E-mail: kagiwada@eng.hokudai.ac.jp

^{*2} 准員, 三菱重工業(株) (〒229-1193 相模原市田名3000)。^{*3} 准員, 東京エレクトロン札幌(株) (〒060-0807 札幌市北区北7条西1丁目)。

Fig. 2 Grinding device with lathe and grinding head

き角 j_G と旋回角 ψ によって、めねじ軸 z に対して三次元的に傾いている。砥石の中心すなわち円すい形砥石における底面の中心あるいは平形砥石における砥石軸上の厚さ方向の midpoint が、砥石座標系 $(r_s - \theta_s - z_s)$ の原点 O_s であり、 O_s は軸 z との距離 L を保ちながら工作物の回転とともにめねじのリード l に従って z 方向に移動する。本研削法は、(1) 普通形状砥石を用いること、(2) 砥石軸の傾き角 j_G はめねじのリード角 j とは一致しないこと、(3) 溝の断面形状が砥石の断面形状の転写ではないこと、(4) 砥石軸が傾き角のみならず旋回角を含めて三次元的に設定されること、の四つの点で通常の総形研削過程とは異なっている。さらに本研削法は、仕上げ溝形状が j_G, ψ, L, j に基づく工作物と砥石の相対運動および砥石の形状によって決定される点で、工具軌跡の工作物への転写に基づく成形タイプの除去加工とも異なる。

j_G と ψ はコンピュータによる研削過程のシミュレーションと、得られる溝表面の形状誤差が許容範囲に収まりかつ最小になるように j_G と ψ を探索する極値探索過程によって決定される。めねじの半径方向における砥石切込み深さ D_c はあらかじめシミュレーションを通して決定され、距離 L は次式により決定される。

$$L = \frac{D_1}{2} + D_c - R_s \cos \psi \quad (1)$$

ここで D_1 はめねじの内径、 R_s は砥石の半径である。 D_c と L との関係はおねじの場合と符号が逆転している。

3. コンピュータ支援

3.1 研削過程のシミュレーション めねじ創成をシミュレーションするために「最深軌跡法」⁽¹⁾を適用する。めねじの場合、研削点の位置が砥石中心から見てねじ工作物の外側にあり、おねじの場合とは幾何学的な関係が異なる。そこでこれらの関係について

Fig. 3 Diagram of grinding process

新たに考察する。以下はその概要である。

図3に示したようにめねじ工作物は円柱座標系 $(r - \theta - z)$ で表され、研削砥石は別の円柱座標系 $(r_s - \theta_s - z_s)$ で表される。めねじの溝表面上の点 p はおねじの場合と同様に円柱座標系 $(r - \theta - z)$ において

$$z = \frac{\theta l}{2\pi} + f_z \quad (2)$$

で表される。ここで f_z は創成された溝表面の z 方向における相対的高さであり、これの r による変化が溝表面の $(\theta=0)$ 断面における断面形状を与える。点 p は同時に砥石表面上の点でもあり、円柱座標系 $(r_s - \theta_s - z_s)$ において

$$z_s = (z - z_l) \cos j_A - r \sin \theta \sin j_A \quad (3)$$

で表される。ここで z_l は砥石の z 方向の切り込みを表す(図3)。また角度 j_A と θ_A は j_G と ψ から

$$\begin{aligned} \sin j_G &= \sin j_A \cos \theta_A \\ \sin \psi &= \frac{\sin j_A \sin \theta_A}{\cos j_G} \end{aligned} \quad (4)$$

によって変換される。

砥石の断面形状は円すい形砥石の底角 β を用いて

$$z_s = (R_s - r_s) \tan \beta \quad (5)$$

で与えられる。さて図3において研削点の位置はおねじの場合と異なるが、幾何学的関係から導かれる

$$\begin{aligned} r_s^2 &= (r \cos \theta - L \cos \theta_A)^2 \\ &+ \{ [r \sin \theta + (z - z_l - L \tan \psi) \tan j_A \\ &- L \sin \theta_A] \cos j_A \}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

はおねじの場合と同一であることがわかる。よってめねじの場合には式(1)のみを変更すればよく、その他の幾何学的な関係はおねじの場合と同一であることが示された。ある半径 $r = r_p$ について式(2), (3), (5), (6)を4個の未知数 z, f_z, z_s, r_s に関する連立方程式として解くと、 f_z が θ の関数として与えられる。 θ が変化するとき f_z も変化しながら点 p が砥石の円

すい面上を $r=r_p$ の軌跡に沿って移動する。ここで f_z が最大値 f_{zp} になるときの p が研削点であり、 $f_{zp}(r_p)$ の値がねじ溝表面の z 座標を与える。

3・2 誤差判定と最適砥石軸角の探索 目的ねじ形状としては、おねじ⁽¹⁾と同様に2形を発展させた理想的なねじ形状を用いる。これは図4に示したように、ねじ溝に垂直な平面(2形)ではなくピッチ線に垂直な平面上におけるねじ面の形が目的の圧力角の直線となるようにするものである。 r_p における目的ねじ溝の z 方向高さ、3・1節で求められた $f_{zp}(r_p)$ との差が高さ誤差 e_H であり、 $D_1/2 \leq r_p \leq D/2$ における e_H の最大値が最大高さ誤差 $e_{H\text{MAX}}$ である。

次に最適砥石軸角の探索を行う。各 j_G と ψ の値について $e_{H\text{MAX}}$ を計算し、 j_G と ψ を独立変数、 $e_{H\text{MAX}}$ を従属変数として極値探索を行い、最小の $e_{H\text{MAX}}$ を与える最適な j_G と ψ の組合せを求める。この極値探索に際しては、アルゴリズムが簡単で確実に極値が求まる「極点取り込み法」⁽¹⁾を用いるが、詳細については省略する。

3・3 砥石干渉のチェック 砥石の厚さがねじ溝の幅に対して大きい場合には砥石の背面が向かいの仕上げねじ面に干渉したり、また圧力角の小さいねじの場合は切り込み途中の砥石の研削面が仕上げねじ面に干渉する危険性がある。このために砥石干渉のチェックシステム⁽²⁾を付加し実行するが、詳細については省略する。

3・4 研削可能なめねじ長さの判定 めねじの内面研削においては傾斜した砥石軸とめねじ内面との干渉を考慮する必要があるが、厳密な干渉の判定法は従来見あたらないようである。本研削法においては砥石軸が三次元に設定されるため干渉の生じ方は通常と異なり、また通常の総形研削との比較を行うために厳密な干渉の判定法の確立を試みる。

図5は干渉の状態を模式的に表したものである。図5中の点 P_I は干渉点を表し、円 O_{SL} は砥石軸の点 P_I

Fig. 4 Location of generatrix in each type of thread

をふくむ軸直角断面の輪郭である。 $z_{SL} = \overline{O_s O_{SL}}$ は干渉点までの砥石軸長さである。円 O_{SL} の半径 R_A は一般的には z_{SL} の関数であるが、ここでは円柱形の砥石軸を用いているから一定とする。点 P_I をふくみ砥石軸に垂直な平面と軸 z との交点を P'_{Iz} とすると、干渉点 P_I は円 O_{SL} 上において点 P'_{Iz} から最も遠い点に位置するから、点 P_I, O_{SL}, P'_{Iz} は一直線上にある。線分 $\overline{P_I P'_{Iz}}$ の軸 z に垂直な平面への投影 $\overline{P_I P'_{Iz}}$ が干渉点 P_I と軸 z の距離 R_{zL} であり、

$$R_{zL} = \frac{z_{SL} \sin j_G}{\cos \theta_{AA}} + R_A \cos j_{GA} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。ここで θ_{AA}, j_{GA} は次式で与えられる。

$$\theta_{AA} = \tan^{-1} \left(\frac{z_{SL} \cos j_G \sin \psi - L}{z_{SL} \sin j_G} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$j_{GA} = \tan^{-1} \left\{ \frac{z_{SL} \left(\frac{1}{\cos j_G \cos \psi} - \cos j_G \cos \psi \right) - L \tan \psi}{\frac{z_{SL} \sin j_G}{\cos \theta_{AA}}} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

距離 R_{zL} がめねじの内半径 $D_1/2$ と等しいとき干渉がおきるから、 $R_{zL} = D_1/2$ とおくことから z_{SL} が

$$z_{SL} = \left(\frac{D_1}{2} - R_A \cos j_{GA} \right) \frac{\cos \theta_{AA}}{\sin j_G} \quad \dots\dots\dots (10)$$

として求められる。式(10)の z_{SL} から研削可能なめねじ長さ z_L が次式で与えられる。

$$z_L = z_{SL} \cos j_G \cos \psi - R_A \sin j_{GA} - R_s \sin \psi - w_z \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで w_z は、研削点がめねじの奥側の開口部から完全に抜けるために必要な送り込みの超過長さであり、たとえば円すい形砥石の場合にはねじ溝の片側の斜面の z 方向幅に相当し、総形研削の場合にはめねじ溝幅の半分に相当する。

Fig. 5 Interference between wheel spindle and inner surface of female screw

4. コンピュータ支援の結果

4.1 砥石形状と加工精度 本研削法の有効性を示すために、メートル台形めねじ Tr 50×12 (谷径 $D=50$ mm, 有効径 $D_2=44$ mm, 内径 $D_1=38$ mm, 垂直圧力角 $\alpha_n=15^\circ$, リード $l=12$ mm) を 1 号平形砥石の縁形 N [直径 34 mm (図 6)] で研削した。円すいの底角 $\beta=20^\circ$ ($V=70^\circ$) は図 7 に示した研削シミュレーションにおける形状精度から以下のように決定した。

図 7 は砥石切込み深さ $D_c=6.5$ mm (ひっかかりの高さ +0.5 mm) のもとで β を変化させた場合の、最適砥石軸角 j_G, ψ と得られる最大高さ誤差 $e_{H\text{MAX}}$ の変化を表したものである。 $0 \leq \beta \leq 30^\circ$ にわたって $e_{H\text{MAX}}$ は通常の総形研削 ($\beta=15^\circ, \psi=0^\circ, j_G=j=4.96^\circ$, 図 7 の右端) によって得られる値 $e_{H\text{MAX}}=15.0 \mu\text{m}$ より遥かに小さいことがわかる。このことは本研削法において普通形状砥石の許容される形状の範囲が極めて大きいことがわかる。

ここで $0 \leq \beta \leq 10^\circ$ の範囲と $15 \leq \beta \leq 30^\circ$ とでは $e_{H\text{MAX}}$ に違いがある。 $0 \leq \beta \leq 10^\circ$ では $j_G, \psi, e_{H\text{MAX}}$ ともに β の変化によらず常に一定である。このことは図 8 に示されるように研削が砥石の斜面ではなく砥石の外周によって行われているためである。図 8 はこの範囲内の $\beta=5^\circ$ において選択された最適砥石軸にお

Fig. 6 Shape of grinding wheel
(JIS Type 1 plane wheel, edge shape N)
 $2R_s=34$ mm, $T=5$ mm, $X=2.5$ mm, $V=70^\circ$ ($\beta=20^\circ$)

Fig. 7 Optimum pairing of j_G and ψ , and given minimum, $e_{H\text{MAX}}$, vs. β ($D_c=6.5$ mm)

Fig. 8 Result of simulation at optimum angles of inclination, $j_G=2.97^\circ, \psi=-2^\circ$ (contour lines of the helicoid surface seen from the grinding wheel axis). Tr 50×12 ($D=50$ mm, $D_2=44$ mm, $D_1=38$ mm, $\alpha_n=15^\circ, l=12$ mm), Type 1 plane wheel edge shape N, $\beta=5^\circ$ ($V=85^\circ$) $2R_s=34$ mm, $D_c=6.5$ mm

(a) contour lines of the helicoid surface seen from the grinding wheel axis

(b) distribution of error in height, e_H , and error in slope angle, e_A

Fig. 9 Result of simulation at optimum angles of inclination, $j_G=2.61^\circ, \psi=5.40^\circ$
Type 1 plane wheel edge shape N, $V=70^\circ$ ($\beta=20^\circ$) $2R_s=34$ mm
Other parameters are the same in Fig. 8.

けるシミュレーションの結果であり、砥石軸方向から見ためねじ面の等高線図である。砥石を表す円周上に、めねじの各半径における研削点を表す小円が存在しており、実際の加工工程においては砥石のエッジを用いた研削が行われることを示している。この範囲の β では縁形は任意で、例えば最も簡単な縁形Aでも可能な点で有用である。ただしエッジは研削過程において欠けや摩耗を生じやすく、普通砥粒の砥石の場合には β のこの範囲は有用ではない。

これに対し $15 \leq \beta \leq 30^\circ$ では図9(a)に示されるように研削が砥石の斜面によって行われており、図7に見られるように β の変化は ψ の変化によってほぼ相殺されて、砥石形状の変化によらずほぼ同一レベルの高い形状精度を達成することが可能である。ここでは図7の結果から、 $e_{H\text{MAX}}$ がほぼ最小($e_{H\text{MAX}}=0.448\text{ }\mu\text{m}$)でかつ β に対して安定な、 $\beta=20^\circ$ に決定した。ここで選択された最適砥石軸角は $j_G=2.61^\circ$ 、 $\psi=5.40^\circ$ である。選択された傾き角 $j_G=2.61^\circ$ はめねじのリード角 $j=4.96^\circ$ とは大きく異なっており、また底角と旋回角の差($\beta-\psi$) $=14.6^\circ$ は圧力角 $\alpha_n=15^\circ$ と異なっている。このことからこの研削状態が総形研削とは明確に異なることがわかる。またこの最大高さ誤差 $e_{H\text{MAX}}=0.448\text{ }\mu\text{m}$ は通常の総形研削によって得られる値 $e_{H\text{MAX}}=15.0\text{ }\mu\text{m}$ の約0.03倍であり、極めて高い精度であることがわかる。

図9は選択された最適砥石軸角におけるシミュレーションの結果であり、図9(a)から研削が砥石の円すい面によって行われていることがわかる。図9(b)はめねじ面の高さ誤差 e_H と傾き誤差 e_A の半径方向の分布を示している。めねじ面はピッチ線の内側でわずかに凹状で外側でわずかに凸状であるが、 e_H の最大値 $e_{H\text{MAX}}=0.448\text{ }\mu\text{m}$ は研削面の粗さよりも小さいものであり、このめねじ研削法の精度がきわめて高いことを示している。

Fig. 10 No wheel interference arises.
Parameters are the same in Fig. 9.

次に3・3節で述べた文献(2)と同様の砥石干渉のチェックを行った。図10は干渉チェックを行った結果であり、選択された条件においては砥石の背面によるの向かいの仕上げめねじ面への干渉も、切り込み途中の研削面による仕上げめねじ面への干渉も生じないことがわかる。

4・2 研削可能なめねじ長さ 図11は最適砥石軸角 j_G, ψ に対する研削可能なめねじ長さ z_L を式(11)によって求め、図7と同様に β に対する変化として表したものである。本研削法と総形研削を同条件で比較するため、送り込みの超過長さ w_z は一律にめねじ溝の片側の斜面の z 方向幅とした。図11において全般に z_L はめねじの谷径 D の2倍以上であり、めねじの長さとしては十分である。 $\beta=20^\circ$ においては総形研削におけるよりも大きく、 $\beta=15^\circ$ においては総形研削のほぼ1.5倍である。このことから本研削法においては、条件の選択によって総形研削では不可能な長いめねじの研削も可能になることを示している。

5. 研削実験

上の4・1節で決定・選択された研削条件で研削実験を行った。めねじ工作物は炭素鋼とし、はじめに切削によって目的形状に研削代を加えた状態まで粗加工を行った。その後底角 $\beta=20^\circ$ のWA砥石を4・1節で選択された条件に設定し仕上げ研削を行った。

本研削法においては砥石設定における旋回角 ψ の存在により1回の工程ではめねじの片面のみが創成される。また砥石形状が軸対称でないため、片面の仕上げ加工が終了した後めねじ工作物を反転して残る片面の加工を行った。この結果、めねじ工作物の反転の際に砥石と工作物の位置調整等の工程が加わった。

図12は研削過程の写真である。めねじ工作物はその外径と同寸の内径をもつリング状のめねじ固定ジグに取付けられ、めねじ固定ジグが旋盤の四つめチャッ

Fig. 11 Length of female screw that can be ground without interference, z_L , with j_G and ψ vs. β ($w_z=1.75\text{ mm}$, $R_s=17\text{ mm}$, $D_c=6.5\text{ mm}$)

Fig. 12 Photograph of grinding process

クで掴まれている。めねじ固定ジグは半径方向に設けられた止めねじによりめねじ工作物を固定するが、このさいに回し金状のアジャスタにより回転方向の固定位置を調整し、これにより砥石の z 方向の切り込み z_t を設定している。

図 13(a)は研削されためねじの外観を示し、(b)は一部を切り落としてねじ面の断面形成を示したものである。これらから研削が完全になされていることがわかる。

6. 形状精度と工程に関する考察

本創成法の利点をねじ形状と形状精度および工程軽減の面から考察する。

形状精度に関しては4・1節に述べたように、本研削法による誤差が総形研削の約0.03倍であり、形状精度を格段に向上しうる。

ねじ形状に関しては4・1節に述べたように、一つのめねじ形状を研削するための砥石形状に選択の幅があり、これは同時に一つの砥石で種々のめねじ形状を研削しうることを意味する。また本論文中では直接には触れていないが、総形研削では不可能な圧力角 0° のめねじも、おねじ⁽²⁾と同様に研削可能であると考えられる。また砥石軸とめねじ内面の干渉によるめねじ長さの限界に関しては、4・2節に述べたように砥石形状、加工条件の選択により総形研削によるよりも長いめねじの加工が可能である。

加工工程に関しては、普通形状砥石は一般に総形ドレッシングより容易であり、例えば本実験に用いた円すい形砥石のドレッシングに要する時間は台形断面の総形砥石の1/3とみることができる。総形ドレッシングに要する時間を大まかに実研削時間の3割とすると、これによって全工程時間はおおよそ2割減少する。一方、5章に述べたように ϕ の存在によりねじ面を片面ずつ加工する必要があり、全除去体積が同じだから

(a) view of female screw

(b) cross sectional shape of helicoid surface

Fig. 13 Ground female screw Tr 50×12

実研削時間は同じとして、 z 方向の位置決め工程に要する、例えば実研削時間の1割の時間が加算される。また砥石形状が軸方向に対称でないために、めねじを反転する工程に要する、例えば実研削時間の2割の時間が加算される。したがって全工程時間はおおよそ1割の増加となる。ただし4・1節に述べたように、例えば縁角Aの砥石を用いれば後者の工程は不要であり、この場合の全工程時間はおおよそ1割の減少となる。しかしいずれも明確な差とはいえない。

以上は普通砥粒の砥石を用いた場合であるが、超砥粒の砥石を用いる場合はユーザによる砥石の成形は一般に不可能であり、市販の普通形状の超砥粒砥石を使用可能な本研削法の利点は多大である。

7. 結 論

本論文では総形ドレッシングを要しないめねじ研削法の開発を行った。その結果、めねじの場合の最深軌跡法においては、おねじの場合と同一の幾何学的条件を適用すればよいことが明らかになった。また全工程時間には明確な差は見られないが、加工されるめねじ形状および砥石形状の選択の幅が大きく広がり、しかも形状精度および加工可能な長さの点でもすぐれた、

極めて有効な加工法であることが示された。

本研究を行うに当たり協力いただいた北海道大学文
部技官 吉田明彦氏に感謝の意を表す。

本研究は平成 9-11 年度文部省科学研究費補助金
[基盤研究 A(2)] (09305012) の助成を得て実施した
ことを明記し関係各位に深謝する。

文 献

- (1) 鍵和田忠男, 総形ドレッシングを要しないコンピュータ
支援めねじ研削, 機論, **58**-545, C(1992), 283-288.
- (2) 鍵和田忠男, 総形ドレッシングを要しないコンピュータ
支援めねじ研削における砥石干渉のチェックシステム, 機
論, **60**-572, C(1994), 1440-1445.