不等リードスクリューにおける研削砥石干渉*

島地重幸^{*1}, 舩重栄治^{*2}, 牧野晋史^{*3}

The Grinding Wheel Interference on the Variable Lead Screw

Shigeyuki SHIMACHI^{*4}, Eiji MASUSHIGE and Shinji MAKINO^{*4} Iwate University, Dept. of Mechanical Engineering,
4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate, 020-8551 Japan

The vacuum pump composed of the variable lead screw is noticed as a potential one that has high power efficiency. In case of the variable lead screw, the grinding wheel has only a point contact with the screw surface. One of the authors tried the grinding by the method that has easy way of calculating the contact point of the mating surfaces. The try resulted in the interference of the grinding wheel and the screw. Accordingly, this paper proposes another way of positioning of grinding wheel and analyzing the contact point. This paper discusses the interference in the axial plane of grinding wheel for the convenience of the wheel design. Then, size and pose of grinding wheel that could avoid the interference are examined numerically. The proposed setting method is clarified to be effective for the interference avoidance. The limitation of pose change of grinding wheel is showed in the relation with the interfered position of surfaces.

Key Words: Machine element, Gear, Pump Screw, Variable Lead Screw, Grinding Wheel, Interference

1. 緒 言

半導体電子部品の製造では大容量の炉を高速に真空にする必要があり、これに答える可能性のある真空ポンプとしてスクリューポンプに期待が集まっている。特に、高い動力効率を得るため、ねじ軸直角歯形が一定で、ねじのリードが軸方向に変化する不等リードねじ面を用いたポンプが注目されている。本研究は、この不等リードのねじ面の研削加工に伴う問題を扱う。

一对のねじ S_1, S_2 を考える。一方のねじ S_1 上の一点が描くトロコイド曲線を、他方 S_2 の軸断面形状としてねじ面 S_2 が作られ、また、ねじ S_2 のピッチ円筒上の一点が描くサイクロイド曲線をねじ S_1 の軸断面形状としているねじ面 S_1 が作られる。ねじ面 S_2 は凹面となる。

現在使用されているものは等リードで、軸断面形状を非対称に与えている^{(1)~(4)(8)(9)}。その加工法については、いくつかの研究^{(5)~(8)}がある。円盤形砥石による

加工に伴う干渉の回避については、砥石の取付角や砥石の大きさを取上げた研究⁽⁸⁾がある。

本研究では、不等リードでしかも対称歯形を扱う。また、ねじ面 S_2 の加工で、後述する工具干渉の問題が生じたので、本研究では、このねじ面だけを対象とする。

工作機械の自由度を多くすることは剛性上、好ましいことではない。そこで、本研究では、ねじはその軸の回りに回転し、円板形研削砥石の軸はその軸とねじ軸の共通垂線の回りに回転し、またねじ送りできるものとする。

最初の研削試行では、工具位置設定の計算が簡単であることから、ねじ軸を含む断面上でねじ面と円板形研削砥石表面とが接触するように工具を設定した。その結果、図1に示すような干渉がねじ面のピッチ円筒近傍に生じた。この種のねじ面加工において、干渉の生じない工具位置の設定法を開発する必要性が生じている。

等リードねじの場合には、工具面とねじ面を線接触させることが出来る。これに対して、ねじリードが不等の場合には、工具面を、ねじ軸方向に変化する曲面のねじ面に対して、点で接触させることになる。この場合、工具の運動を簡単にすることや、容易に接触点

* 原稿受付 1999年9月27日。

^{*1} 正員、岩手大学工学部(☎020-8551 盛岡市上田4-3-5)。^{*2} 帝人製機(株)(☎514-8533 津市片田町老町594)。^{*3} 岩手大学学生。

E-mail: shimachi@iwate-u.ac.jp

Fig. 1 Interfered screw surface

Fig. 2 Screw surface

を探索するような方法を工夫する必要がある。

本研究では、接触点を求める方法、干涉が生じるか否かを判定する方法、干涉が生じない工具の設定の実用的な方法を提案する。

2. ねじ面と工具面

2.1 ねじ面 図2に示すように、ねじ軸上に原点O、ねじ軸をz軸とする直交右手座標系O-xyzを定める。また、各軸方向の単位ベクトルを*i*, *j*, *k*とする。

断面 $z=0, w$ でのリードをそれぞれ L_0, L_1 とする。断面 $z=z_\theta$ でのリードを L 、またその断面での形状は、断面 $z=0$ での形状をZ軸まわりに角 θ_z 回転させたものとする。このとき、リード L は

$$L = L_0 + \frac{L_1 - L_0}{w} z_\theta \quad (1)$$

となる。断面 $z=z_\theta$ のz軸から距離 r_s のねじ筋のリード角 β_{zr} は、

$$\beta_{zr} = \tan^{-1} \left(\frac{L}{2\pi r_s} \right) \quad (2)$$

となる。また、角 θ_z 、位置 z_θ はそれぞれ

$$\theta_z = \frac{2\pi w}{L_1 - L_0} (\ln L_1 - \ln L_0) \quad (3)$$

$$z_\theta = \frac{w}{L_1 - L_0} \left\{ \exp \left(\theta_z \frac{L_1 - L_0}{2\pi w} + \ln L_0 \right) - L_0 \right\} \quad (4)$$

図2に $z=0$ 断面の概要を示す。対象としているねじのピッチ円半径を r_{p0} とし、軸直角断面はトロコイ

ド曲線とする。厳密には、ピッチ円の近傍は角張らないように曲線を用い、またピッチ円よりも外側に少しはみ出した形状を持っている。本研究には、これらの差異は本質的なものではないので、省略する。

まず、ねじ面法線 $\mathbf{n}_\phi$ を求めることにする。軸直角基準断面上の点の座標をパラメータ ε を用い、 $(X_{0i}(\varepsilon), Y_{0i}(\varepsilon))$ とし、ベクトル $\mathbf{r}_{s0}$ で表す。

$$\mathbf{r}_{s0} = (X_{0i}, Y_{0i}, 0) \quad (5)$$

また、その大きさを

$$r_{s0} = \sqrt{X_{0i}^2 + Y_{0i}^2} \quad (6)$$

とする。また、基準断面形状の接線ベクトルを $\mathbf{t}_{p0}$ とする。

軸直角の基準断面形状をねじ運動、すなわち角 θ_z 回転させ、軸方向に $z=z_\theta$ 移動させて得られるねじ断面形状 $\mathbf{r}_s$ は

$$\mathbf{r}_s = R(\mathbf{k}, \theta_z) \mathbf{r}_{s0} + z_\theta \mathbf{k} \quad (7)$$

となる。

ここに、記法 $R(\mathbf{a}, \theta) \mathbf{b}$ は、ベクトル $\mathbf{b}$ を単位ベクトル $\mathbf{a}$ の回りに角 θ だけ回転させたときのベクトル $\mathbf{c}$ を表す。ベクトル $\mathbf{c}$ は

$$\mathbf{c} = (\mathbf{b} \cdot \mathbf{a}) \mathbf{a} + \{ \mathbf{b} - (\mathbf{b} \cdot \mathbf{a}) \mathbf{a} \} \cos \theta + (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \sin \theta \quad (8)$$

で表される。

ねじが角度 ϕ だけ回転したときのねじ面 $\mathbf{r}_{s\phi}$ は

$$\mathbf{r}_{s\phi} = R(\mathbf{k}, \theta_z + \phi) \mathbf{r}_{s0} + z_\theta \mathbf{k} \quad (9)$$

となる。

次に、断面曲線上の点Pを通るリード線の接線方向ベクトル $\mathbf{t}_h$ および断面曲線の接線方向ベクトル $\mathbf{t}_p$ を求める。軸直角基準断面において、ベクトル $\mathbf{r}_{s0}$ に垂直なベクトルを $\mathbf{v}_{p0} = (-Y_{0i}, X_{0i}, 0)$ とする。 θ_z 回転したときのリード角は β_{zr} であるから、リード線の接線 $\mathbf{t}_h$ のz方向成分は $r_{s0} \tan \beta_{zr}$ となる。ゆえに、ねじが ϕ 回転したときのこれらの合成ベクトルは、

$$\mathbf{t}_{h\phi} // R(\mathbf{k}, \theta_z + \phi) \mathbf{v}_{p0} + r_{s0} \tan \beta_{zr} \mathbf{k} \quad (10)$$

で表すことができ、これはリード線の接線ベクトルと平行である。

角 θ_z 回転した断面形状の接線ベクトル $\mathbf{t}_p$ は

$$\mathbf{t}_p = R(\mathbf{k}, \theta_z) \mathbf{t}_{p0} \quad (11)$$

となり、ねじが ϕ 回転したときの接線ベクトルは

$$\mathbf{t}_{p\phi} = R(\mathbf{k}, \theta_z + \phi) \mathbf{t}_{p0} \quad (12)$$

となる。したがって、ねじ面法線 $\mathbf{n}_\phi$ は

$$\mathbf{n}_\phi = \mathbf{t}_{h\phi} \times \mathbf{t}_{p\phi} \quad (13)$$

で表される。

2.2 工具面 図3に示すように、工具曲面をトーラス面とし、工具回転軸を ξ 軸、 ξ 軸とz軸の共通

Fig. 3 Tool surface and its position

垂線を ξ 軸, ζ 軸と ξ 軸の交点 O_c を原点とし, $O_c - \xi\eta\zeta$ が右手系を成すように η 軸を定める。また, 同図に示すように, z 軸に対する ζ 軸の成す角を ξ 軸回りに測り, γ とする。

$$\xi = (1, 0, 0) \dots\dots\dots (14)$$

$$\eta = (0, \cos \gamma, \sin \gamma) \dots\dots\dots (15)$$

$$\zeta = (0, -\sin \gamma, \cos \gamma) \dots\dots\dots (16)$$

ζ 軸と ξ 軸の交差する点 O_c の位置を

$$\overrightarrow{OO_c} = (C_x, 0, C_z) \dots\dots\dots (17)$$

とする。トーラス面の中心を O_r , トーラス面の断面円の中心を T , その半径を C_c , 中心面のオフセットを C_s , またトーラス面の中心円の半径を C_r とする。

$$\overrightarrow{OO_r} = (C_x, -C_s \sin \gamma, C_z + C_s \cos \gamma) \dots\dots (18)$$

2.3 工具軸の傾き γ 緒言で述べたように最初の試行ではねじ軸を含む断面で工具面がねじ面と接触するように傾き角を与え, その結果, 干渉が生じた。そこで, 本研究では試みに次のように基準の角度を定め, 干渉を回避しやすい傾きを探すことにする。

ねじ面が ϕ 回転したとき, 基準断面を角度 $\theta_z = -\phi$ 回転させた断面は z 軸方向に $z_{\theta 0}$ 進んでいる。

$$z_{\theta 0} = \frac{w}{L_1 - L_0} \left\{ \exp \left(-\phi \frac{L_1 - L_0}{2\pi w} + \ln L_0 \right) - L_0 \right\} \dots\dots\dots (19)$$

ピッチ円筒上のリード線のリード $L_{\theta 0}$ は

$$L_{\theta 0} = L_0 + \frac{(L_1 - L_0) z_{\theta 0}}{w} \dots\dots\dots (20)$$

となる。このリード線のリード角を基準の傾き γ_0 とする。

$$\gamma_0 = \tan^{-1} \left(\frac{L_{\theta 0}}{2\pi r_{p0}} \right) \dots\dots\dots (21)$$

ここに, r_{p0} はねじのピッチ円半径である。工具軸の傾き γ を, 傾きを変えるための $\Delta\gamma$ を用い,

$$\gamma = \gamma_0 + \Delta\gamma \dots\dots\dots (22)$$

とし, 注目している断面の近傍のねじ面を創成するこ

Fig. 4 Relation of contact points A, B, C

とにする。

2.4 トーラス面と工具面の接触点 接触点では両曲面の法線, および曲面上の接触点の位置が一致する。ここでは, 最初に, ねじ面の位置 A を試みに与え, 面法線が一致するような工具曲面上の位置 C を求める。次に, これら両曲面上の位置が一致するようにねじ面上の試行点を探すという方法をとる。

工具の傾き γ については 2.3 節で示したように与え, 工具の z 軸方向の位置を示すパラメータ C_z については, 初期位置として $C_z = z_{\theta 0}$ と定める。

ϕ 回転したねじ面上の点 $A(\epsilon, \theta_z)$ を与える。この点のねじ面法線を n_ϕ とする。これと同じ方向の法線を持つトーラス面上の点 C は次のように定まる。その点 C での法線がトーラス中心円と交わる点を T とすると,

$$\overrightarrow{OT} = C_r \zeta \times (\zeta \times n_\phi) / |\zeta \times (\zeta \times n_\phi)| \dots\dots (23)$$

したがって, トーラス面上の点 C は

$$r_{CT} = \overrightarrow{OO_r} + \overrightarrow{OT} - C_c n_\phi \dots\dots\dots (24)$$

と表される。

図 4 に示すように, 工具面上の点 C とねじ面上の点 A を一致させる方法として, 工具全体をねじ軸 z 方向に距離 s だけ平行移動させて, 点 C が点 A の接平面上に来るようにする。移動後の両点の相対位置ベクトル D は

$$\mathbf{D} = \mathbf{r}_{CT} - \mathbf{r}_{S\phi} + s\mathbf{k} \quad (25)$$

で表される。\$\mathbf{D}\$ と歯面法線 \$\mathbf{n}_\phi\$ は垂直であるから、

$$\mathbf{D} \cdot \mathbf{n}_\phi = 0 \quad (26)$$

したがって

$$s = -\{\mathbf{n}_\phi \cdot (\mathbf{r}_{CT} - \mathbf{r}_{S\phi})\} / (\mathbf{n}_\phi \cdot \mathbf{k}) \quad (27)$$

これを式(25)に代入し、

$$\mathbf{D} = \mathbf{r}_{CT} - \mathbf{r}_{S\phi} - \{\mathbf{n}_\phi \cdot (\mathbf{r}_{CT} - \mathbf{r}_{S\phi})\} / (\mathbf{n}_\phi \cdot \mathbf{k}) \mathbf{k} \quad (28)$$

ねじ面のパラメータ \$(\theta_z, \varepsilon)\$ に対する偏微分を求め、ニュートンの逐次近似により、補整量 \$\Delta\theta_z, \Delta\varepsilon\$ を次のように求める。

$$\mathbf{D} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \theta_z} \Delta\theta_z + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \varepsilon} \Delta\varepsilon = 0 \quad (29)$$

式(29)に \$\mathbf{n}_\phi \times \mathbf{D}\$ を内積し、

$$(\mathbf{n}_\phi \times \mathbf{D} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \theta_z}) \Delta\theta_z + (\mathbf{n}_\phi \times \mathbf{D} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \varepsilon}) \Delta\varepsilon = 0 \quad (30)$$

また、式(29)に \$\mathbf{D}\$ を内積し

$$\mathbf{D}^2 + (\mathbf{D} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \theta_z}) \Delta\theta_z + (\mathbf{D} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \varepsilon}) \Delta\varepsilon = 0 \quad (31)$$

この結果、工具の軸位置は次のように定まる。

$$\overrightarrow{OO_T} = (C_x, -C_\xi \sin \gamma, C_z + s + C_\xi \cos \gamma) \quad (32)$$

3. ねじ面と工具面の干渉の解析

2章で工具とねじ面の相対位置が確定した。この位置で工具面がねじ面と干渉しているか否かを調べる必要がある。

トラス面である工具面の、工具軸を含む断面の形状は円である。含軸断面を軸の回りに回すとき、ねじ面との交線を含軸断面内で描いて得られる交線群が工具断面形状の実質部分に入り込まなければ干渉はなく、一部でも入り込めば干渉し合うことになる。

軸直角断面で定義される基準断面形状をねじ運動させてねじ面が作られているので、ここでは、軸直角断面形状の曲線が工具含軸断面と交わる点の軌跡を求めることにする。

基準断面形状を \$\theta_z\$ 回転させ、ねじ運動させた断面形状上の点 \$\mathbf{r}_{S\phi}\$ から工具軸までの距離 \$\xi_p\$、点 \$O_T\$ からその点 \$\mathbf{r}_{S\phi}\$ までの、工具軸 \$\zeta\$ 方向の距離 \$\zeta_p\$ はそれぞれ、次のように求まる。

$$\xi_p = \sqrt{(\mathbf{r}_{S\phi} - \overrightarrow{OO_T})^2} \quad (33)$$

$$\zeta_p = (\mathbf{r}_{S\phi} - \overrightarrow{OO_T}) \cdot \boldsymbol{\zeta} \quad (34)$$

4. 数値解析による干渉の検討

本研究では、試行では干渉した図1に示すねじ面の

場合を計算例とする。

「ねじ形状と砥石形状」ねじ面については、

$$L_0 \doteq 160, L_1 \doteq 80, w \doteq 340, r_{p0} \doteq 60,$$

とする。

ねじ溝幅に対する溝深さは大きく、ねじ溝底も研削するには砥石トラス面の断面半径を小さくしなければならぬ。この数値計算例では、一例としてトラス面の断面半径を \$C_c = 0.1\$、オフセットを \$C_\xi = 0\$ に固定し、中心円の半径については何種類かに対して調べることにした。後述するように、接触点の位置を与えることにする。この結果として、工具軸とねじ軸の距離 \$Cx\$ は決まる。

この数値計算例では、砥石の形状を実際の形状から外れ、トラス面だけとして、それとの干渉の状態を調べることとした。図6以降には砥石軸断面形状が矩形として示されているが、これは図の縦軸と横軸の縮尺が大きく異なり、トラス断面の円が小さいためである。

「干渉部位名と基準接触点」図5にねじ溝を示す。溝に向かって左側の面を \$L\$ 面、右側のそれを \$R\$ 面とする。このねじ溝に円板状の砥石を挿入し、\$L\$ 面と点 \$P\$ で接触させる。このとき、砥石円盤の傾き補整を \$\Delta\gamma\$ を正とすると、ねじ面 \$L\$ とは部位 \$A\$ で、また面 \$R\$ とは \$D\$ で干渉しあう可能性がある。逆の円盤傾き補整の時には、部位 \$C, D\$ で干渉する可能性が出てくる。

試行により、ねじリード角が大きい部分では干渉が生じ難いことがわかった。そこで、実際に利用される範囲の中でリード角の小さい例として \$\phi = 20^\circ\$ の断面を示す。また、工具とねじ面の接触点がねじ面先端に近いほど干渉し難いことがわかった。そこで、ねじ面の根元に近い \$r_{s0} \doteq 35\$ に基準接触点を定めた。この断

Fig. 5 Possible interference positions on the screw groove

面の歯先に置けるリード角は $\gamma_0 = 1.85^\circ$ である。

「砥石の傾きとその半径の影響」砥石の傾き補正を $+1.7^\circ$ と -1.4° について、またまた、工具曲面であるトラス面の中心円の半径を $C_r = 20, 50, 200$ の 3 種類としたものを基準データとして調べることにした。

補正 $\Delta\gamma$ を $+1.7^\circ$ とし、角 θ_z を 5° きざみで表した断面形状の軌跡を示す。 γ 補正を+にする場合、砥石含軸断面とねじ断面との成す角が小さくなるので、図 6 に示すように断面形状に似た軌跡が得られる。

補正 $\Delta\gamma$ が+で、砥石半径を 20, 50, 200 とする場合の結果を図 6 に示す。カッター半径の小さい 20 mm の場合には干渉が発生しなかったが、50, 200 mm には部位 A の包絡線は矩形で示した砥石と干渉している。

結果を示してはいないが、補正 $\Delta\gamma$ を大きくしてもねじ面の根元での干渉は見られず、先端部のみに干渉が生じた。また、カッター半径を大きくするほど干渉量が深くなる。

図 7 は傾き補正 $\Delta\gamma$ を -1.4° にしたものを示す。ねじ断面の軌跡が補正 $\Delta\gamma$ が+のときとは異なり、歯形が縦長でそれを横に並べたような軌跡となってい

る。 $\Delta\gamma = 0$ のときの角度 γ は 1.85° であるので、 $\Delta\gamma = -1.4^\circ$ のときの角度 γ は 0.45° で零に近い値である。 γ が 0° のとき、砥石軸はねじ軸と平行になり、砥石含軸断面とねじ断面との成す角は 90° となり、砥石含軸断面内のねじ断面は直線となる。これがねじ断面の軌跡が縦長である理由である。

$\Delta\gamma = -1.4^\circ$ では、砥石半径が 50 と 200 の場合に干渉した。半径を大きくしていくと、まず部位 C を中心に干渉し、次いで点 B が干渉し始める。また、 $\Delta\gamma$ が+の場合と異なる点は、半径が大きくなるに連れて、ねじ面の根元も干渉することである。

紙面の都合上、データは示していないが、この 3 つの砥石半径に共通して干渉の起こらなかった $\Delta\gamma$ の範囲は、およそ $-0.7 \leq \Delta\gamma \leq 1.2$ であった。これは、砥石半径 200 mm において干渉の起こらなかった $\Delta\gamma$ の範囲に対応する。

「基準接触点の位置の影響」データを示してはいないが、基準接触点がねじ面の先端に近くなるほど干渉は起き難くなる。先端に接触点を定めると、工具半径が無限大でもねじ面と接触することはないから、当然のことである。

「L 面と R 面の干渉しやすさの違い」上述の例はい

Fig. 6 Traces of screw profiles intersecting with the tool axial plane square-like box shows the tool, tool axis correction $\Delta\gamma = +1.7$ deg

Fig. 7 Traces of screw profiles intersecting with the tool axial plane square-like box shows the tool, tool axis correction $\Delta\gamma = -1.4$ deg

Fig. 8 The case corresponding to Fig. 6(b) but the tool contacts another side profile

ずれも接触点を L 面上に置いたものである。接触点を R 面上に置いた場合の一例を図 8 に示す。これは L 面の図 6 (b) に対応するものであり、 R 面の場合の干渉量が少し大きくなっているが、全体的には、 L 面と R 面での干渉の生じやすさの違いは小さいことがわかった。

「円板砥石の補強と干渉しやすさについて」砥石の実部はトーラス面だけであるとして、干渉の生じやすさを調べた。この場合の砥石は厚さ 0.2 mm の円板であり、現実的な形状ではない。 L 面を研削するには砥石の R 面側を厚くして強度を持たせなければならない。この場合、計算結果が示すよりも R 面側で干渉しやすくなる。この R 面側の補強可能な程度を知る上では、砥石軸断面上でねじ面との干渉を表現した本研究の方法が便利であることがわかる。

「凸面をもつねじ面の場合について」本報告ではねじ面は凹面形状をもっている。スクリーポンプとするには、凸面をもつねじ面が必要であるが、干渉の生じない円盤砥石の設定の方法は凹面と比較して簡単であり、本報告では取上げなかった。

5. 結 言

凹面で不等リードをもつねじ面を、円板形砥石で加工する際の工具干渉について考察した。まず、

(1) 砥石面とねじ面の接触点を求める方法を示した。また、砥石とねじ面の工具干渉を回避するには、

(2) 砥石傾け角 γ を式 (21) で求めた値を中心として、干渉しない角度を探す必要がある。

ことがわかった。さらに、実例に近い数値を中心として干渉のしやすさを調べた結果、

1. 砥石傾き補整 $\Delta\gamma$ が-の場合と比べて、+の場合のほうが干渉し難い。
  2. 砥石半径が大きくなると干渉しやすい。
  3. 干渉する場合、砥石傾き補整 $\Delta\gamma$ が+ではねじ先端付近で、-では根元から先端にかけて干渉する。
  4. 補整 $\Delta\gamma=0$ では、調査範囲では干渉しない。
  5. リードの大きい所では干渉し難い。
- などがわかった。

文 献

- (1) 藤原満・ほか 3 名, スクリュー圧縮機のパフォーマンス解析, 機論, 50-452, B(1984), 1027-1033.
- (2) 藤原満・ほか 3 名, スクリュー圧縮機のパフォーマンス解析, 機論, 51-466, B(1985), 1816-1824.
- (3) 藤原満・ほか 3 名, スクリュー圧縮機のパフォーマンス解析, 機論, 51-472, B(1985), 3954-3951.
- (4) 田村久司・ほか 3 名, スクリュー圧縮機のロータ歯形に関する研究, 機論, 62-597, C(1996), 2005-2011.
- (5) 久曾神煌・ほか 3 名, 舞いツールによるスクリーポンプ機用ロータの精密仕上, 機論, 51-471, C(1985), 3131-3134.
- (6) 久曾神煌・ほか 3 名, 舞いツールによるスクリーポンプ機用ロータの精密仕上, 機論, 52-484, C(1986), 3292-3295.
- (7) 久曾神煌・ほか 3 名, 舞いツールによるスクリーポンプ機用ロータの精密仕上, 機論, 54-508, C(1988), 3102-3105.
- (8) 西田知照・ほか 3 名, 成形研削用砥石輪郭の計算法, 精密工学会誌, 58-4(1992), 628-634.
- (9) 特許: UAS 3314589