

# スクリーロータホブの精密製作法\*

(ペンシル形二番研削砥石の輪郭設計法)

岸 佐年<sup>\*1</sup>・堀内富雄<sup>\*2</sup>・両角宗晴<sup>\*3</sup>・吉田嘉太郎<sup>\*4</sup>・斎藤正之<sup>\*5</sup>

## A Precision Machining Method for Profile of Screw Rotor Hob (A Profile Design Method of Pencil Type Relief Grinding Wheel)

Satoshi KISHI, Tomio HORIUCHI, Muneharu MOROZUMI,  
Yoshitaroh YOSHIDA and Masayuki SAITOH

A precise analysis has been made for a design method in order to obtain the profile of a pencil type relief grinding wheel for a hob which cuts a given screw rotor surface, especially in the case in which the cutting edge profile of the hob is given as a series of dispersive points. Firstly, it is clarified that under certain circumstances a singular point (a cusp) will occur on the profile of the relief grinding wheel corresponding to the cutting edge profile of the hob, and that, because of the cusp, the interference phenomenon will occur on the profile of the relief grinding wheel. Secondly, numerical analyses for the following two purposes are proposed. One is to determine the interference by using a conditional equation of the cusps. And the other, which is more important is to obtain the profile of the relief grinding wheel. Then, these theoretical analyses are verified by applying them to the dimensions of screw rotor hobs.

キーワード：機械要素，二番研削，ペンシル形研削砥石，ねじ解析，ホブ切れ刃，干渉現象

### 1. 結 言

一般にスクリーロータのようなねじ面の加工においては、諸元が与えられたねじ面を加工する回転工具（フライスカッタまたは砥石）の輪郭を定める要求が多い。また生産性向上のためにはホブ切りが有利であり、与えられた輪郭のねじ面を創成するホブの切れ刃輪郭を定める要求も多い。さらに、このホブに所望通りの正しい切れ刃輪郭を与えるための二番研削砥石の輪郭を求めることも大きな課題となる。

一方、この種の問題では特許などの関係でねじ輪郭の設計根拠が伏せられていることや、数式で与えられた輪郭に対し熱変形などを加味したために、ねじ輪郭を離散的な座標値の点列で与えざるを得ない場合がある。したがって、得られたホブ切れ刃輪郭も離散点列となり、この点列に対応する二番研削砥石の輪郭も点

列で求められる。

著者らは既に、ねじ輪郭を離散点列で与えた場合の回転工具の輪郭設計法、逆に回転工具の輪郭を点列で与えた場合に創成されるねじ面の輪郭を求める解析法、またねじ輪郭を離散点列で与えた場合のホブの切れ刃輪郭設計法、さらにこのホブ切れ刃輪郭を得るための二番研削砥石の輪郭設計法、ホブ切れ刃輪郭を離散点列で与えこれにより創成加工されるねじ面の輪郭を定める場合などについて、数値解析法を示しこれらを用いて回転工具やスクリーロータホブの試作実験を行い良い結果を得ている<sup>(1)~(6)</sup>。

しかし、このような特殊輪郭の総形ホブの場合、円盤形砥石で創成される二番面の形状はやや中凹形となり、さらに左右の二番面の間に微小な段差も生じる。したがって、このようなホブの切れ刃面を研ぎ直した場合、切れ刃輪郭の変化はそのまま刃形誤差となって現れるためにその値が大きい傾向となり、さらに切削されるスクリーロータの歯形誤差となって現れる<sup>(7),(8)</sup>。このような総形ホブの場合でも、バイトにより二番取りされた二番面は中凹形となることもなく、研ぎ直しに伴う刃形誤差はさほど大きくならないはずである。この傾向は、ペンシル形の砥石を用いてホブの二番研削を行う場合にも当てはまる。

\* 本研究は平成11年度長野高専教育研究特別経費の助成を受けて行われた。

<sup>\*1</sup> 電子制御工学科教授

<sup>\*2</sup> 電子制御工学科助手

<sup>\*3</sup> 信州大学名誉教授

<sup>\*4</sup> (株)コガネイ開発本部

<sup>\*5</sup> 石川島汎用機械システム技術課

原稿受付 2000年10月27日

そこで本研究では、スクリーロータホブの切れ刃輪郭が離散点列で与えられた場合について、ペンシル形二番研削砥石の輪郭設計法について考察する。すなわち、ホブ切れ刃輪郭を複数の曲線の連続体と見積り、これに対応するペンシル形砥石の輪郭を複数の曲線の連続体として求める解析法を示す。さらに、この場合に砥石輪郭に生じる干渉問題を明らかにし、干渉を生じない砥石輪郭の設計法と数値解析法を示す。そして、パーソナルコンピュータなどの小型電算機を用い、少ない計算量で簡易にしかも厳密にペンシル形二番研削砥石の輪郭を設計できるシステムを構築する。これにより、より高い精度が要求されるホブ切れ刃輪郭の点列に対し、ペンシル形二番研削砥石の輪郭を的確に設計することが可能となる。

2. 理論解析

本研究のような軸平行切れ刃みぞのホブで輪郭が左右非対象な場合は、切れ刃全周にバランスよく二番を付けるために二番取りカムの作用方向を傾けて加工する。いま二番取り研削盤用カムのカムライズを  $S_{mm}$  とすれば、二番取り係数  $k$  (単位角当たりの二番取り量  $mm/rad$ )、半径方向二番取り係数  $k_r$ 、軸方向二番取り係数  $k_a$  は次式で表される。ただし、 $N_G$  はホブの切れ刃みぞ数、 $\Gamma_K$  はカムの作用方向角を示す。

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{N_G S}{2\pi} \\ k_r &= \frac{N_G S}{2\pi} \cos \Gamma_K \\ k_a &= \frac{N_G S}{2\pi} \sin \Gamma_K \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

また、ホブのピッチ円半径  $R_C$ 、リード  $L$ 、ホブ基礎ねじの進み角  $\beta_H$  との間には次式が成り立つ。

$$\tan \beta_H = \frac{L}{2\pi R_C} \quad (2)$$

2-1 ホブ切れ刃輪郭から砥石輪郭を求める方法

いま、ホブの座標系  $O_H-X_H Y_H Z_H$  上の点列で与えられたホブ切れ刃輪郭を、アキマの方法で補間し各区間を次式で表す。ただし  $t$  は媒介変数である。

$$\left. \begin{aligned} X_H &= G(t) = G \\ Y_H &= 0 \\ Z_H &= H(t) = H \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

そこで図1に示すように、ホブの座標系  $O_H-X_H Y_H Z_H$  に対して、 $X_H$  軸上を  $b$  だけ離れた点  $o_0$  を原点とし、 $\zeta_0$  軸が  $Z_H$  軸と向かい合うようにペンシル形砥石側の静止座標系  $o_0-\xi_0 \eta_0 \zeta_0$  を考える。

さて、二番取り研削盤を用いてペンシル形砥石により行う二番研削においては、ホブが負方向に角  $\phi$  だけ回転する間に、砥石は  $k_r \phi$  だけホブ軸に近付き、同時にホブ軸の正方向に  $(R_C \tan \beta_H + k_a) \phi$  だけ並進移動する。そこで、ホブ切れ刃を角  $\phi$  だけ負の方向に回転したものを、あらためて座標系  $O_H-X_H Y_H Z_H$  で表すと次式となる。

$$\left. \begin{aligned} X_H &= G \cos \phi \\ Y_H &= -G \sin \phi \\ Z_H &= H \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

したがって、二番研削時のホブ切れ刃の動きを砥石側の静止座標系で見ると、次に示すトロコイド曲面を描いて運動する。

$$\left. \begin{aligned} \xi_0 &= b - G \cos \phi - k_r \phi \\ \eta_0 &= G \sin \phi \\ \zeta_0 &= H - (R_C \tan \beta_H + k_a) \phi \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

いま図1に示すように、 $\zeta_0$  軸上を原点  $o_0$  から  $c$  だけ離れた点を原点  $o$  とし、 $\eta_0$  軸を中心として座標系  $o-\xi \eta \zeta$  を  $\Gamma_g$  だけ回転した座標系  $o-\xi \eta \zeta$  を考え、 $\xi$  軸を砥石軸とするペンシル形砥石の座標系とする。ここで、 $\Gamma_g$  は  $\xi_0$  軸と  $\xi$  軸とのなす角であり、図1のように時計方向回転を正とする。

そこで、式(5)で表されるトロコイド曲面を砥石の座標系  $o-\xi \eta \zeta$  で見ると次式となる。

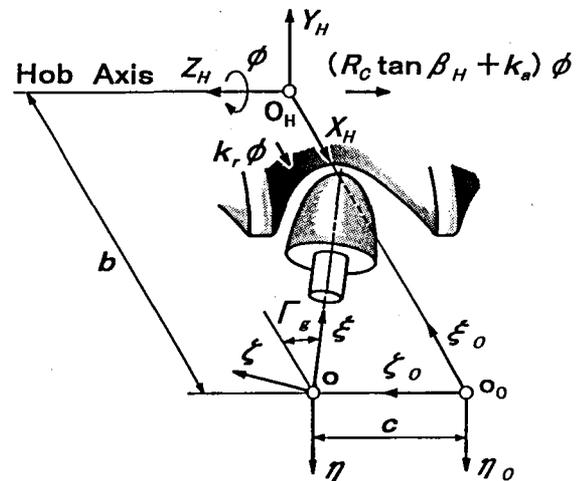


図1 ホブと砥石の座標系

$$\left. \begin{aligned} \xi &= (b - G \cos \phi - k_r \phi) \cos \Gamma_g \\ &\quad - \{H - (R_C \tan \beta_H + k_a) \phi - c\} \sin \Gamma_g \\ \eta &= G \sin \phi \\ \zeta &= (b - G \cos \phi - k_r \phi) \sin \Gamma_g \\ &\quad + \{H - (R_C \tan \beta_H + k_a) \phi - c\} \cos \Gamma_g \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

このホブ切れ刃が描くトロコイド曲面と二番研削砥石面との間には一本の接触線が存在し、この接触線を砥石軸周りに旋回させることにより砥石面が得られる。したがって砥石面上の任意半径を  $\rho$  とすると、ペンシル形二番研削砥石の軸断面輪郭として次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \sqrt{(\eta^2 + \zeta^2)} \\ \xi &= (b - G \cos \phi - k_r \phi) \cos \Gamma_g \\ &\quad - \{H - (R_C \tan \beta_H + k_a) \phi - c\} \sin \Gamma_g \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \eta &= G \sin \phi \\ \zeta &= (b - G \cos \phi - k_r \phi) \sin \Gamma_g \\ &\quad + \{H - (R_C \tan \beta_H + k_a) \phi - c\} \cos \Gamma_g \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(7)は  $t$  と  $\phi$  とで表される曲線群を示すから、この曲線群の包絡線がペンシル形二番研削砥石の軸断面輪郭を表す。包絡線の条件式は、式(7)に対して次のヤコビアンを計算して求められる。

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial \rho}{\partial t} & \frac{\partial \xi}{\partial t} \\ \frac{\partial \rho}{\partial \phi} & \frac{\partial \xi}{\partial \phi} \end{vmatrix} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{\partial \xi}{\partial \phi} - \frac{\partial \rho}{\partial \phi} \frac{\partial \xi}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

これより次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} f(t, \phi) &= [(b - G \cos \phi - k_r \phi) \sin \Gamma_g \\ &\quad + \{H - (R_C \tan \beta_H + k_a) \phi - c\} \cos \Gamma_g] \\ &\quad \times \{ (R_C \tan \beta_H + k_a) \dot{G} \cos \phi - G \dot{H} \sin \phi + k_r \dot{H} \} \\ &\quad + G \sin \phi \{ -G \dot{G} \cos \Gamma_g + k_r \dot{G} \cos \Gamma_g \sin \phi \\ &\quad - (R_C \tan \beta_H + k_a) \dot{G} \sin \Gamma_g \sin \phi \\ &\quad - G \dot{H} \sin \Gamma_g \cos \phi \} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ただし

$$\dot{G} = \frac{dG}{dt}, \quad \dot{H} = \frac{dH}{dt}, \quad \ddot{G} = \frac{d^2G}{dt^2}, \quad \ddot{H} = \frac{d^2H}{dt^2}$$

2-2 砥石輪郭上に生じる干渉の判定法 次に、ペンシル形砥石の軸断面輪郭について極値を求めることを考える。式(7) (8) (9) から次式を得る。

$$\frac{d\xi}{d\rho} = \frac{\frac{d\xi}{dt}}{\frac{d\rho}{dt}} = \frac{\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \xi}{\partial \phi} \frac{d\phi}{dt}}{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial \phi} \frac{d\phi}{dt}} = \frac{U_G}{V_G} \quad (11)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} U_G &= \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \xi}{\partial \phi} \frac{d\phi}{dt} = \dot{\xi} + \bar{\xi} \dot{\phi} \\ V_G &= \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial \phi} \frac{d\phi}{dt} = \dot{\rho} + \bar{\rho} \dot{\phi} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここで

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{d\phi}{dt}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = \dot{\eta}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \dot{\zeta}, \quad \frac{\partial \eta}{\partial \phi} = \bar{\eta}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \bar{\zeta}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \dot{\rho}, \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} = \dot{\xi}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial \phi} = \bar{\rho}, \quad \frac{\partial \xi}{\partial \phi} = \bar{\xi} \end{aligned}$$

などで表し、式(7) (8) (10) よりそれぞれ次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\rho} &= \frac{\eta \dot{\eta} + \zeta \dot{\zeta}}{(\eta^2 + \zeta^2)^{1/2}} \\ \bar{\rho} &= \frac{\eta \bar{\eta} + \zeta \bar{\zeta}}{(\eta^2 + \zeta^2)^{1/2}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\xi} &= -\dot{G} \cos \phi \cos \Gamma_g - \dot{H} \sin \Gamma_g \\ \bar{\xi} &= (G \sin \phi - k_r) \cos \Gamma_g + (R_C \tan \beta_H + k_a) \sin \Gamma_g \\ \dot{\eta} &= \dot{G} \sin \phi \\ \bar{\eta} &= G \cos \phi \\ \dot{\zeta} &= -\dot{G} \cos \phi \sin \Gamma_g + \dot{H} \cos \Gamma_g \\ \bar{\zeta} &= (G \sin \phi - k_r) \sin \Gamma_g - (R_C \tan \beta_H + k_a) \cos \Gamma_g \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{-\frac{\partial f}{\partial t}}{\frac{\partial f}{\partial \phi}} = -\frac{A}{B} \quad (15)$$

ここで

$$\begin{aligned} A &= [+(R_C \tan \beta_H + k_a) \ddot{G} \sin \Gamma_g (b - G \cos \phi - k_r \phi) \cos \phi \\ &\quad - (R_C \tan \beta_H + k_a) \dot{G}^2 \sin \Gamma_g \cos^2 \phi \\ &\quad - G \dot{H} \sin \Gamma_g (b - G \cos \phi - k_r \phi) \sin \phi \\ &\quad - G \ddot{H} \sin \Gamma_g (b - G \cos \phi - k_r \phi) \sin \phi \\ &\quad - G \dot{G} \dot{H} \sin \Gamma_g \sin \phi \cos \phi \\ &\quad + k_r \ddot{H} \sin \Gamma_g (b - G \cos \phi - k_r \phi) \\ &\quad - k_r \dot{G} \dot{H} \sin \Gamma_g \cos \phi + (R_C \tan \beta_H + k_a) \ddot{G} \cos \Gamma_g \\ &\quad \times \{ H - (R_C \tan \beta_H + k_a) \phi - c \} \cos \phi \\ &\quad + (R_C \tan \beta_H + k_a) \dot{G} \dot{H} \cos \Gamma_g \cos \phi \\ &\quad - \dot{G} \dot{H} \cos \Gamma_g \{ H - (R_C \tan \beta_H + k_a) \phi - c \} \sin \phi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -G\ddot{H} \cos \Gamma_g \{ H - (R_C \tan \beta_H + k_a)\phi - c \} \sin \phi \\
 & -G\dot{H}^2 \cos \Gamma_g \sin \phi + k_r \ddot{H} \cos \Gamma_g \{ H \\
 & - (R_C \tan \beta_H + k_a)\phi - c \} + k_r \dot{H}^2 \cos \Gamma_g \\
 & - 2G\dot{G}^2 \cos \Gamma_g \sin \phi - G^2 \ddot{G} \cos \Gamma_g \sin \phi \\
 & + k_r \dot{G}^2 \cos \Gamma_g \sin^2 \phi + k_r G \ddot{G} \cos \Gamma_g \sin^2 \phi \\
 & - (R_C \tan \beta_H + k_a) \dot{G}^2 \sin \Gamma_g \sin^2 \phi \\
 & - (R_C \tan \beta_H + k_a) G \ddot{G} \sin \Gamma_g \sin^2 \phi \\
 & - G^2 \ddot{H} \sin \Gamma_g \sin \phi \cos \phi \tag{16} \\
 B = & -k_r (R_C \tan \beta_H + k_a) \dot{G} \sin \Gamma_g \cos \phi \\
 & - (R_C \tan \beta_H + k_a) \dot{G} \sin \Gamma_g (b - k_r \phi) \sin \phi \\
 & + 2k_r G \dot{H} \sin \Gamma_g \sin \phi - G \dot{H} \sin \Gamma_g \\
 & \times (b - k_r \phi) \cos \phi - k_r^2 \dot{H} \sin \Gamma_g \\
 & - (R_C \tan \beta_H + k_a)^2 \dot{G} \cos \Gamma_g \cos \phi \\
 & - (R_C \tan \beta_H + k_a) \dot{G} \cos \Gamma_g \\
 & \times \{ H - (R_C \tan \beta_H + k_a)\phi - c \} \sin \phi \\
 & + G \dot{H} \cos \Gamma_g (R_C \tan \beta_H + k_a) \sin \phi \\
 & - G \dot{H} \cos \Gamma_g \{ H - (R_C \tan \beta_H + k_a)\phi - c \} \cos \phi \\
 & - k_r \dot{H} \cos \Gamma_g (R_C \tan \beta_H + k_a) - G^2 \dot{G} \cos \Gamma_g \cos \phi \\
 & + 2k_r G \dot{G} \cos \Gamma_g \sin \phi \cos \phi \tag{17}
 \end{aligned}$$

求めたペンシル形砥石輪郭上での極値は式(11)の分子が  $d\xi/dt = U_G = 0$  のときである。そしてこの時、同時に式(11)の分母が  $d\rho/dt = V_G = 0$  となる場合があり、したがってこの点では  $d\xi/d\rho = U_G/V_G = 0/0$  で不定となり、特異点(尖点)となる。このように、得られたペンシル形砥石輪郭上で尖点が生じることは後述する数値解析例によって明らかにされる。

得られたペンシル形砥石輪郭上で尖点が発生すると、輪郭は尖点で折り返す形状となり尖点付近には二つの輪郭が同時に存在することになる。このうち砥石軸から遠い側の輪郭は虚の輪郭であり、実際の砥石輪郭とはなり得ない。したがって、この虚の輪郭に対応するホブ切れ刃輪郭は砥石輪郭を正しく定められなかったことになる。そしてこの場合、たとえば虚の輪郭を省いた形状に砥石輪郭を定めて二番研削を行うと、ホブ切れ刃輪郭は所望通りの形状とはならず干渉を生じる。これらのことから、砥石輪郭上での尖点発生の有無を把握できれば、二番研削における干渉現象を把握することができることになる。そこで今後の数値解析例では、ペンシル形砥石輪郭が尖点となる条件式として式(12)を用い、 $U_G = 0$  と  $V_G = 0$  とを同時に満足する特異点に注目して進める。

### 3. 数値解析法

3-1 ホブ刃形輪郭点列の補間法 いま、与えられたホブ基礎ねじ面の軸断面輪郭をホブ切れ刃輪郭(ホブ切れ刃面が軸断面内にある)と考え、この点列を座標値  $(X_{Hj}, Z_{Hj}), \dots, (X_{Hj}, Z_{Hj}), \dots, (X_{Hn}, Z_{Hn})$  と表わし、点  $j$  と点  $(j+1)$  との間の小区分を表わす区分多項式をアキマの方法で補間し、 $t$  を媒介変数として次の3次式で与える<sup>9)</sup>。

$$\left. \begin{aligned}
 X_H &= G = t \\
 Z_H &= H = a_j + b_j(t - X_{Hj}) \\
 &\quad + c_j(t - X_{Hj})^2 + d_j(t - X_{Hj})^3
 \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

したがって、それぞれ次式を得る。

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{G} &= 1 \\
 \dot{H} &= b_j + 2c_j(t - X_{Hj}) + 3d_j(t - X_{Hj})^2
 \end{aligned} \right\} \tag{19}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \ddot{G} &= 0 \\
 \ddot{H} &= 2c_j + 6d_j(t - X_{Hj})
 \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

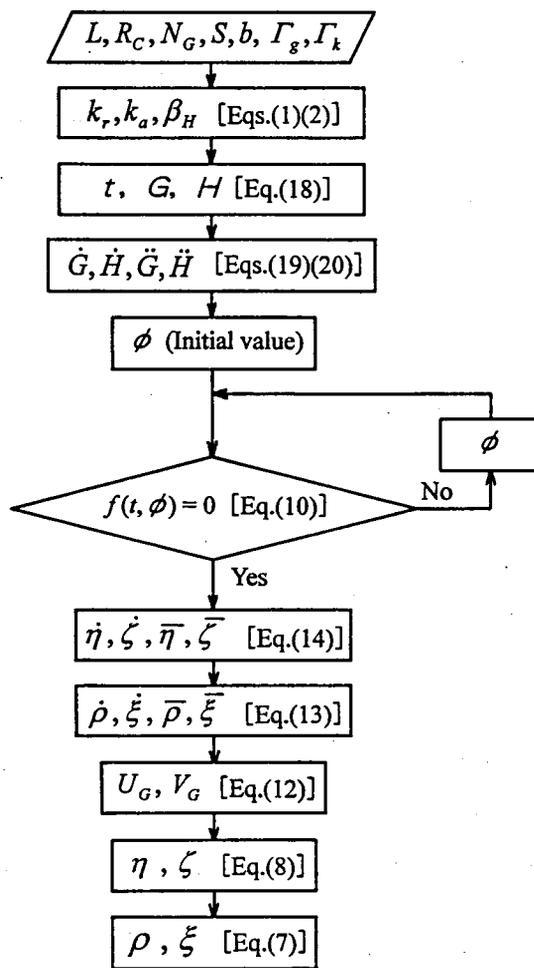


図2 数値解析手順

3-2 砥石の輪郭計算法と干渉の判定法  
いま、式(18)でホブ切れ刃輪郭が与えられたとき、このホブに所望通りの正しい切れ刃輪郭を与えるためのペンシル形二番研削砥石の輪郭を求める数値解析と、砥石輪郭上での干渉発生の有無の判定は、図2に示す手順によりなされる。

4. 数値計算例と試作実験および考察

著者らは既に、図3に示す圧縮機用スクリーロータ(雄形・雌形ねじ)を創成切削するホブの切れ刃輪郭を求めており<sup>(3)</sup>、これを図4・図5に示す。そこでこれらの輪郭を点列で与え、このホブを二番研削するペンシル形砥石の輪郭を求めることを考える。雄形・雌形ロータおよびそれぞれのホブの諸元を表1に示す。この場合、カムの作用方向角 $\Gamma_K=0^\circ$ 、カム高さ $S=7.0\text{mm}$ 、ホブ切れ刃みぞ数 $N_G=16$ とする。

4-1 雄形ロータ用ホブの二番研削砥石輪郭の設計

いま、雄形ロータ用ホブの二番研削砥石輪郭を求めるために、与えられたホブ切れ刃輪郭点列のホブ谷底に相当する点( $j=110$ )を $X_H$ 軸が通り、ホブの原点 $O_H$ から $X_H$ 軸上を $b(=100.0\text{mm})$ だけ離れた点を原点とする座標系 $o-\xi-\eta-\zeta$ を設定した。

この場合、砥石は図4に示すホブ切れ刃の $X_H$ 軸の左側切れ刃用砥石と右側切れ刃用砥石との二個使いとした。そこで、左側切れ刃用砥石と右側切れ刃用砥石が創成運動によりホブ切れ刃輪郭上で $0.5\text{mm}$ 程度重なること、研削速度が零となる砥石先端部分を $\phi 2.0\text{mm}$ 程度逃がすことを加味して原点の移動量 $c$ の値を決定する。

はじめに左側切れ刃用の砥石輪郭を定めるために、原点の移動量 $c=4.800\text{mm}$ 、砥石軸の傾け角を $\Gamma_g=10^\circ$ とし、座標系 $o-\xi-\eta-\zeta$ を設定した。さらに、前述の計算手順により干渉現象発生の有無をみるための $U_G$ と $V_G$ および $\rho$ と $\xi$ を計算した。図6はその結果を示

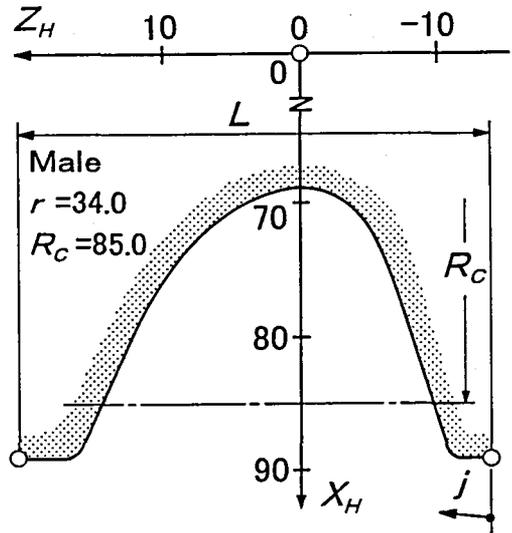


図4 雄形ロータ用ホブの形状

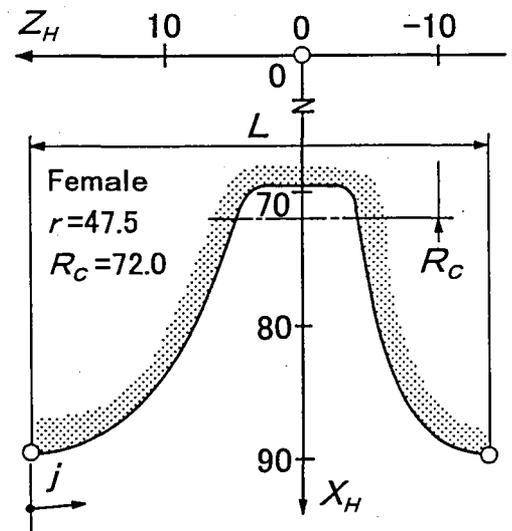


図5 雌形ロータ用ホブの形状

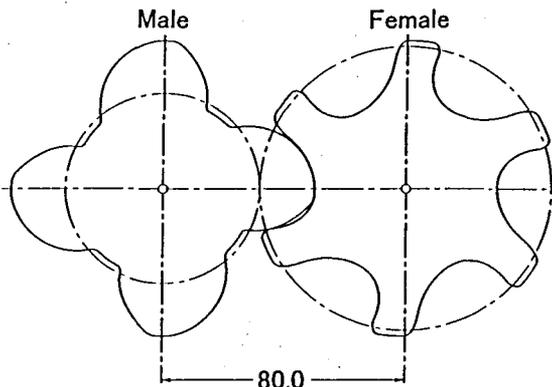


図3 スクリーロータの歯形

表1 スクリーロータとホブの諸元

Items	Male	Female
Center distance of rotors	80.000	
Major diameter of rotor	$d_k$	100.000
Pitch diameter of rotor	$d_c$	64.000
Root diameter of rotor	$d_b$	59.944
Number of thread of rotor	$n$	4
Hand of lead of rotor		Left
Lead of rotor	$l$	180.000
Number of coordinates	$j =$	1~219
Pitch radius of hob	$R_C$	85.000
Root radius of hob	$R_b$	69.000
Major radius of hob	$R_k$	89.028
Lead of hob	$L$	34.485
Number of hob thread	$N_H$	1
Lead angle of hob	$\beta_H$	$3^\circ 41' 40''$

し、 $U_G=0$  と  $V_G=0$  とを同時に満足する特異点は存在せず、したがって干渉の発生はないことが確認された。この場合の、得られた二番研削砥石の輪郭を図 7 に示す。

次に、右側切れ刃用の砥石輪郭を定めるために、原点の移動量  $c=-4.880$  mm, 砥石軸の傾け角を  $\Gamma_g=-10^\circ$  となるように座標系  $o-\xi\eta\zeta$  を設定し、 $U_G$  と  $V_G$  および  $\rho$  と  $\xi$  を計算した。図 8 はその結果を示し、 $U_G=0$  と  $V_G=0$  とを同時に満足する特異点は存在せず、したがって干渉の発生はないことが確認された。この場合の、得られた二番研削砥石の輪郭を図 9 に示す。

さらに、左側切れ刃用砥石および右側切れ刃用砥石とも、原点の移動量  $c$  と砥石軸の傾け角  $\Gamma_g$  を種々の値に設定し、同様な数値解析を行った。その結果、どの設定値に対しても  $U_G=0$  と  $V_G=0$  とを同時に満足する特異点は存在せず、干渉を生じることなく砥石輪郭を定めることのできることを確認された。

4-2 雌形ロータ用ホブの二番研削砥石輪郭の設計

次に、雌形ロータ用ホブの二番研削砥石輪郭を求めるために、与えられたホブ切れ刃輪郭点列のホブ谷底の中央に相当する点 ( $j=98$ ) を  $X_H$  軸が通り、ホブの原点  $O_H$  から  $X_H$  軸上を  $b (=100.0$  mm) だけ離れた点を原点とする座標系  $o_0-\xi_0\eta_0\zeta_0$  を設定した。この場合も、雄形ロータ用ホブの二番研削砥石輪郭設計と同様の設計手法を用い、砥石は左側切れ刃用砥石と右側切れ刃用砥石との二個使いとした。

はじめに左側切れ刃用の砥石輪郭を定めるために、原点の移動量  $c=4.171$  mm, 砥石軸の傾け角を  $\Gamma_g=10^\circ$  とし、座標系  $o-\xi\eta\zeta$  を設定した。さらに、前述の計算手順により干渉現象発生の有無をみるための  $U_G$  と  $V_G$  および  $\rho$  と  $\xi$  を計算した。図 10 はこの場合について、 $U_G$  と  $V_G$  とを計算して表した干渉判定線図を示す。この図 10 より、点 ( $j=87$ ) から点 ( $j=93$ ) の近傍において、 $U_G=0$  と  $V_G=0$  とを同時に満足する様子が見て取れ、干渉発生が予想できる。図 11 はこの場合について、得られた二番研削砥石の輪郭上に尖点による折り返し(干渉)が生じている様子を示す。したがってこの場合には、与えられたホブ切れ刃輪郭に対応する砥石輪郭が的確に定まらないことになる。このような干渉を避けるために、原点の移動量  $c$  と砥石軸の傾け角  $\Gamma_g$  とを種々の値に設定して計算を試みた。その結果、 $\Gamma_g \geq 11^\circ 21' 14''$  (このとき  $c \geq 4.997$  mm) となるように設定すれば、このような干渉は生じないことが確認できた。そこで、試作のための数値例として  $\Gamma_g=15^\circ$  (このとき  $c=6.794$  mm) とする。図 12 は  $\Gamma_g=15^\circ$  の場合の干渉判定線図であり、 $U_G=0$  と  $V_G=0$  とを同時に満足することはなく、干渉は生じない。この場合の砥石輪郭を図 13 に示す。

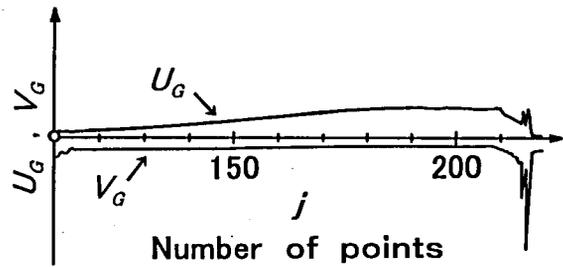


図6 干渉判定線図(雄形, 左切れ刃,  $\Gamma_g=10^\circ$ )

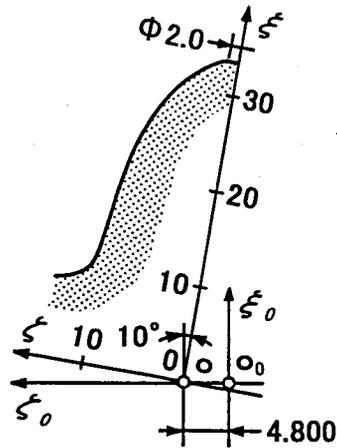


図7 砥石の形状(雄形, 左切れ刃,  $\Gamma_g=10^\circ$ )

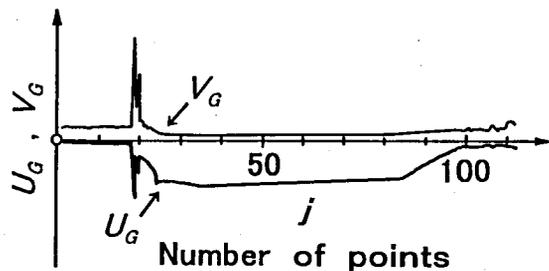


図8 干渉判定線図(雄形, 右切れ刃,  $\Gamma_g=-10^\circ$ )

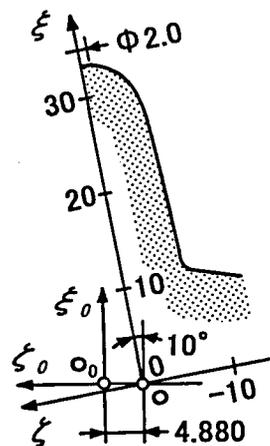


図9 砥石の形状(雄形, 右切れ刃,  $\Gamma_g=-10^\circ$ )

次に、右側切れ刃用の砥石輪郭を定めるために、原点の移動量  $c = -4.801\text{mm}$ 、砥石軸の傾け角を  $\Gamma_g = -10^\circ$  と設定し、 $U_g$ と $V_g$ および $\rho$ と $\xi$ を計算した。図14はこの場合について、 $U_g$ と $V_g$ とを計算して表した干渉判定線図を示す。この図14より、点( $j=107$ )から点( $j=115$ )の近傍において、 $U_g=0$ と $V_g=0$ とを同時に満足する様子が見取れ、この場合に得られた二番研削砥石の輪郭上に尖点による折り返し(干渉)が生じている様子を図15に示す。この場合も、与えられたホブ切れ刃輪郭に対応する砥石輪郭が的確に定まらない。このような干渉を避けるために、前述と同様に原点の移動量  $c$  と砥石軸の傾け角  $\Gamma_g$  とを種々の値に設定して計算を試みた。その結果、 $\Gamma_g \leq -13^\circ 45' 04''$  (このとき  $c \leq -6.755\text{ mm}$ ) となるように設定すれば、このような干渉は生じないことが確認できた。そこで、試作のための数値例として  $\Gamma_g = -15^\circ$  (このとき  $c = -7.407\text{ mm}$ ) とした。図16は  $\Gamma_g = -15^\circ$  の場合の干渉判定線図であり、 $U_g=0$ と $V_g=0$ とを同時に満足することはなく、干渉は生じない。この場合の砥石輪郭を図17に示す。

4-3 砥石の試作と二番研削実験 次に、図13と図17に示す雌形ロータ用ホブの左右切れ刃用二番研削砥石の試作を行った。この場合、砥石はCBN砥石であり、S45C材を地金としボラゾン(#230)を約  $80\mu\text{m}$  の厚さに電着させた。図18は試作したペンシル形二番研削砥石の写真である。

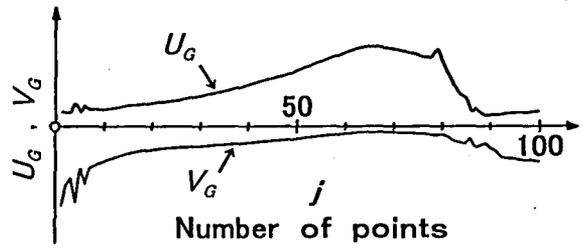


図12 干渉判定線図(雌形, 左切れ刃,  $\Gamma_g = 15^\circ$ )

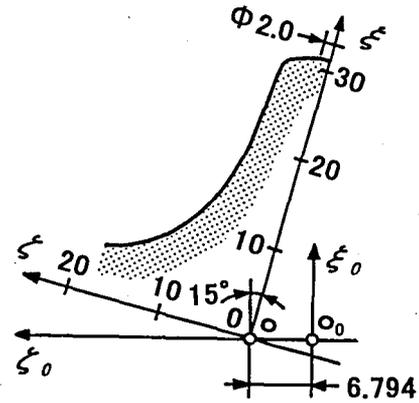


図13 砥石の形状(雌形, 左切れ刃,  $\Gamma_g = 15^\circ$ )

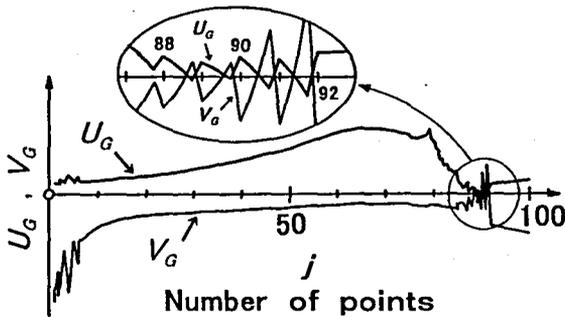


図10 干渉判定線図(雌形, 左切れ刃,  $\Gamma_g = 10^\circ$ )

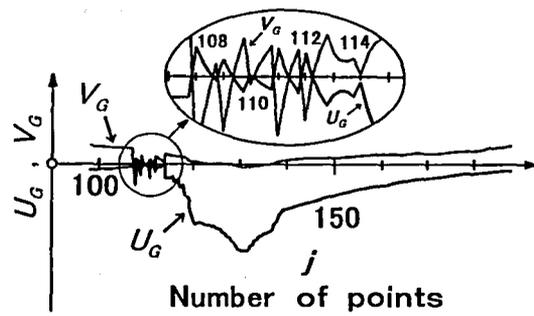


図14 干渉判定線図(雌形, 右切れ刃,  $\Gamma_g = -10^\circ$ )

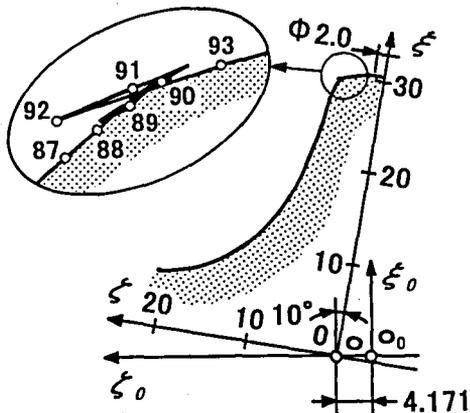


図11 砥石上に生じた尖点(雌形, 左切れ刃,  $\Gamma_g = 10^\circ$ )

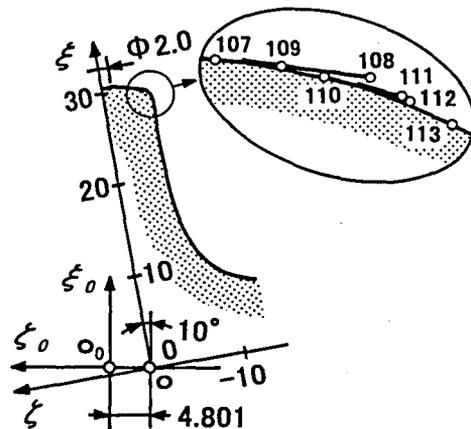


図15 砥石上に生じた尖点(雌形, 右切れ刃,  $\Gamma_g = -10^\circ$ )

そこで、これらの砥石の軸断面輪郭についてUMMを用いて測定し、その結果を図 19 に示す。この図 19 から、砥石の輪郭誤差は最大で  $20\mu\text{m}$  程度であり、かなり精度の良い砥石が得られた。また、図 20 はこれらの砥石を用いた二番研削実験の様子を写真で示す。この場合、砥石が粗仕上げされた二番面を切れ刃と平行に削り取る様子が観察でき、理論通りの研削が行われたことを確認した。

さらに、このホブの切れ刃輪郭についてUMMを用いて測定した。図 21 はこの測定の写真であり、図 22 はこの場合の誤差線図を示す。この図 22 より、曲率変化が大きく高精度な二番研削が困難な隅肉部 ( $j=88$  付近と  $j=112$  付近)を除くと、ホブの切れ刃輪郭誤差は最大で  $20\mu\text{m}$  程度であることが分かり、極めて精度の良い総形ホブが製作された。

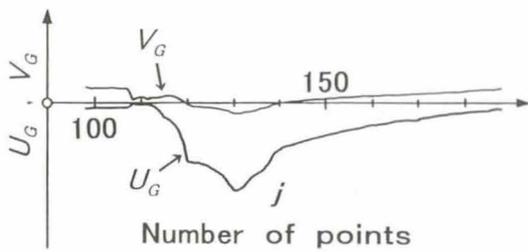


図 16 干渉判定線図(雌形, 右切れ刃,  $\Gamma_g = -15^\circ$ )

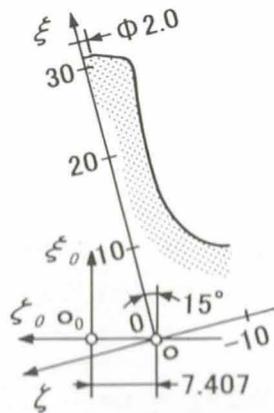


図 17 砥石の形状(雌形, 右切れ刃,  $\Gamma_g = -15^\circ$ )



図 18 ペンシル形二番研削砥石

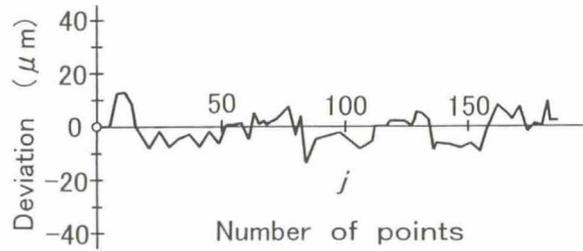


図 19 ペンシル形二番研削砥石の輪郭誤差

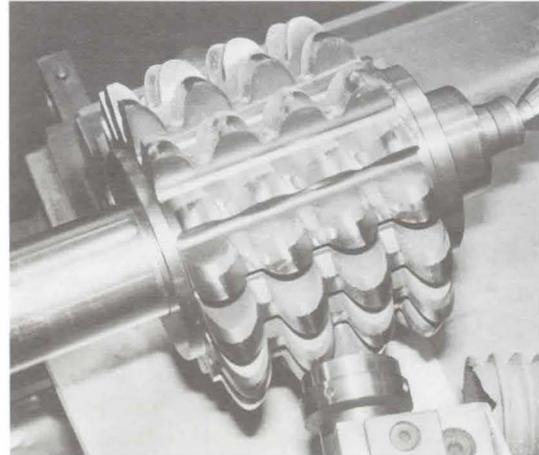


図 20 二番研削実験

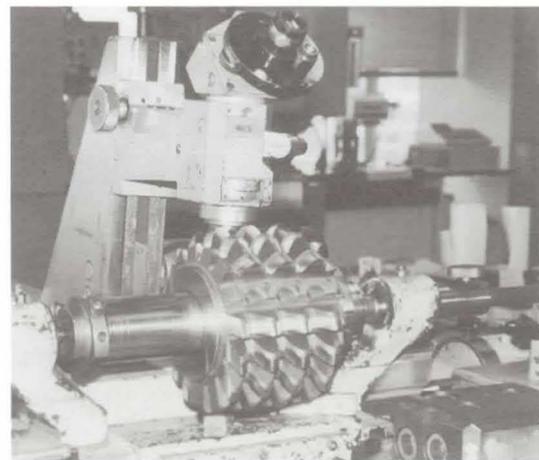


図 21 試作したスクリーロータホブの測定

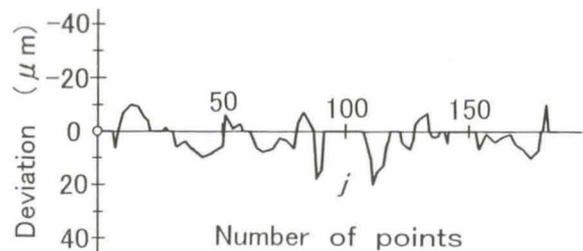


図 22 ホブ切れ刃の輪郭誤差

## 5. 結 言

スクリーロータホブの切れ刃輪郭が離散的数値の点列で与えられた場合について、ペンシル形二番研削砥石の輪郭設計法を詳細に考察し、次のことを明らかにした。

(1) 離散点列で与えられたホブ切れ刃輪郭を複数曲線の連続体と見積った場合、対応して得られたペンシル形二番研削砥石の輪郭上に特異点(尖点)が存在する場合がある。この場合、要求されたホブ切れ刃輪郭と一対一で対応する砥石輪郭を正しく設計することができない。

(2) 理論解析により尖点の条件式を求め、これを用い尖点の発生の有無を確認しつつ干渉の状況を把握し、パソコンなどの小型電算機を用い少ない計算量で簡易にしかも厳密に二番研削砥石の輪郭を設計できる数値解析法を示した。このことにより、より高い精度が要求されるホブ切れ刃輪郭の点列に対し、ペンシル形二番研削砥石の輪郭を的確に設計することが可能となった。

(3) ペンシル形砥石を用いて二番研削されたホブは、二番面の形状が中凹形となることもなくさらに左右の二番面の間に微小な段差を生じることもなく、極めて精度良く製作される。

(4) 本論文の数値例のようにホブ切れ刃輪郭が左右非対称な総形の場合に、切れ刃全周にバランス良く二番を付けるために、ホブの半径方向二番取りと軸方向二番取りとを加味した二番取り法について解析理論を確

立した。

最後に、ホブの試作に助力された(株)不二越に対しまして感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 吉田嘉太郎・両角宗晴・岸 佐年・斎藤正之, 干渉を考慮したねじ切り回転工具の設計法(第1報, ねじの輪郭を与えて回転工具の輪郭を求める方法), 機論, 61-582, C(1995), 484-491.
- (2) 吉田嘉太郎・両角宗晴・岸 佐年・斎藤正之, 干渉を考慮したねじ切り回転工具の設計法(第2報, 回転工具の輪郭を与えてねじの輪郭を求める方法), 機論, 61-585, C(1995), 2113-2120.
- (3) 吉田嘉太郎・両角宗晴・岸 佐年・堀内富雄・斎藤正之, 干渉を考慮したスクリーロータホブの設計法(第1報, スクリーロータの輪郭を与えてホブ基礎ねじの輪郭を求める方法), 機論, 63-609, C(1997), 1745-1752.
- (4) 吉田嘉太郎・両角宗晴・岸 佐年・堀内富雄・斎藤正之, 干渉を考慮したスクリーロータホブの設計法(第2報, ホブの輪郭を与えて二番研削砥石の輪郭を求める方法), 機論, 63-609, C(1997), 1753-1759.
- (5) 吉田嘉太郎・両角宗晴・岸 佐年・堀内富雄・斎藤正之, 干渉を考慮したスクリーロータホブの設計法(第3報, 二番研削砥石の輪郭を与えてホブの輪郭を求める方法), 機論, 63, 611C(1997), 2504-2510.
- (6) 吉田嘉太郎・両角宗晴・岸 佐年・堀内富雄・斎藤正之, 干渉を考慮したスクリーロータホブの設計法(第4報, ホブ基礎ねじの輪郭を与えてスクリーロータの輪郭を求める方法), 機論, 64, 621C(1998), 1814-1821.
- (7) 吉田嘉太郎・両角宗晴・岸 佐年・堀内富雄・斎藤正之, スクリーロータホブの研ぎ直しによる刃形誤差の解析, 日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集, (1997, 3), 31-32.
- (8) 堀内富雄・岸 佐年・両角宗晴・吉田嘉太郎・斎藤正之, スクリーロータホブの研ぎ直しによる刃形輪郭誤差の解析, 機論, 66, 646C(2000), 1981-1987.
- (9) 長嶋秀世, 数値計算法(改訂2版), (1986), 31, 槇書店.