心なし研削における成円作用安定条件の同定手法と 最適セットアップ条件設定手法に関する研究*

森 谷 卓** 金 井 彰*** 宮 下 政 和†

A Study on a Method of Identification of Stability Conditions and a Method of Selecting the Optimum Set-up Conditions for Rounding Effect in Centerless Grinding.

Takashi MORIYA, Akira KANAI and Masakazu MIYASHITA

Centerless grinding is characterized by supporting a workpiece with the periphery to be ground under a preliminary selected geometrical arrangement and in viewpoint of rounding action there exist geometrical/statical stability and also a dynamic stability in the grinding system. Work set-up conditions such as center-height angle, work speed in revolution and top angle of work support blade dominate the stability of rounding action. Therefore, for selecting the optimum work set-up conditions for stability, it is necessary to prepare a practical guideline to enable to satisfy both the geometrical/statical stability and also the dynamic stability simultaneously. In the present paper, an identification method for the dynamic stability conditions and also a method of integration of the geometrical/statical stability with dynamic one are proposed. Application of the proposed method enables to give a practical guideline to select the optimum work set-up conditions.

Key words : grinding, centerless grinding, stability of grinding system, centerless grinding machine, roundness, grinding mechanism

1. 緒 言

心なし研削は大量生産加工のみならず高精度加工にも適した有用な加工法である。しかしながら、心なし研削加工においては、心高角、工作物回転速度、ブレード頂角等のセットアップ条件がほんの少し変化しただけで自励びり振動を生じるようになったり、工作物外周の加工面にうねり山数が3山や5山等の奇数のうねり山（等径歪円）が生じたり、うねり山数が比較的大きな偶数のうねり山（異径歪円）が生じたりするため、心なし研削加工系はセットアップ条件に非常に敏感であるといわれている。このため、単に現場の経験だけでなく、理論に裏打ちされた実用的で見通しの良いセットアップ条件の設定指針を与えることが強く望まれている。しかし、従来の研究⁴⁾⁵⁾⁹⁾では安定なセットアップ条件を設定するときに最も重要な実際の安定条件を同定する手法が論じられておらず、この点を含めたより実用的なセットアップ条件の設定指針が必要である。

本論文は、前報⁹⁾で新たに提案した位相合致成円作用安定判別線図に基づいて、実際の動力学安定条件の同定手法と、実際の研削作業における制約条件を考慮しながら同定した安定条件を用いた最適セットアップ条件の設定手法とを提示することを目的とする。まず最初に安定研削をするために考慮しなければならない成円作用の基本的な安定条件を示す。次に、安定なセットアップ条件を決定するに当たり、最も重要な実際の動力学安定条件を新たに提案する研削実験データにより同定する手法を示す。また本手法による動力学安定条件の同定手法および研削盤の動特性である安定限界曲線の同定手法は、心なし研削盤の性能評価法としても非常に有効であることを示す。最後

に、同定した動力学安定条件と幾何学／静力学的安定条件とを用いて研削作業上の制約条件等を考慮しながら両安定条件を満足するように統一的にセットアップ条件を設定する手法を提案する。そして、本設定手法が成円作用最適化の見通しの良い指針になることを示した。

2. 心なし研削における成円作用の基本的な安定条件

図1に心なし研削加工系の幾何学的配置と記号を示す。

以下の(1)～(3)に、成円作用の安定性が問題となる可能性のあるうねり山数と、その具体的な加工現象およびその成円作用の基本的な安定条件をまとめて示す。これらについては既に前報⁹⁾で位相合致成円作用安定判別線図を用いて線図上に(1)～(3)を同時に示した。

(1) 心高角 γ が低い場合の3山、5山、7山等の奇数うねり山数加工現象：等径歪円

安定条件： $\gamma=0^\circ$ 近辺を避け、可能な限り $\gamma=6\sim7^\circ$ 近辺を選ぶ¹⁾。

(2) $180^\circ/\gamma$ 近傍の比較的大きな偶数うねり山数

γ : Center-height angle

H : Center-height

n_w : Work speed in revolution

θ : Top angle of work support blade

Fig.1 Geometrical arrangement of centerless grinding

* 原稿受付 平成15年7月8日

** 正会員 シチズン時計(株)(所沢市下富840)

*** 正会員 足利工業大学(足利市大前町268)

† 名誉会員 Nano.tec 研究所(国分寺市東元町1-13-5)

加工現象：異径歪円（幾何学／静力学的安定性に関する問題）
安定条件：最適設定は ϕ/γ （奇数）となるようにブレード頂角 θ および心高角 γ を選ぶ¹⁾。

(3) f_n/n_w 近辺のうねり山数（研削盤の固有振動数: f_n ）

加工現象：自励びり振動（動力学的安定性に関する問題）
安定条件： n_w/γ を安定範囲に設定する⁴⁾⁶⁾⁹⁾。

最適な成円作用を得るセットアップ条件に設定するためには、実際の研削作業における制約条件を考慮して(1)～(3)の安定条件を同時に満足する心高角 γ 、工作物回転速度 n_w およびブレード頂角 θ の組合せを決定する必要がある、これらの条件に適合する組合せが複数存在するときには最も成円作用が安定したセットアップ条件を選定することになる。

3. 動力学的安定条件の同定

実際に安定なセットアップ条件を設定しようとする、最も重要な問題はどのようにして動力学的安定条件 n_w/γ を求めるかということである。前報⁹⁾では、研削盤の静剛性、動特性、研削剛性、調整砥石および研削砥石の接触剛性、等々のパラメータを詳細に求めて位相合致成円作用安定判別線図を用いて安定判別を行った。これらは要因分析的に安定性を評価するためには必要であるが、実際にセットアップ条件を設定するときにはより直接的な実際の動力学的安定条件を同定する必要がある。

そこで比較的少数の研削実験データに基づいて実際の動力学的安定条件 n_w/γ を同定する手法を説明する。前報⁹⁾では、各種心高角 γ と工作物回転速度 n_w との組合せで自励びり振動の発生状況を示すと、基本的には不安定領域は図2の斜線内部のようになり、動力学的安定条件は n_w/γ で決まることを位相合致成円作用安定判別線図を用いて理論的および実験的に示した。

自励びり振動の発生状況がこのような形状になることを利用して、動力学的安定条件の n_w/γ を図2に示すように比較的少数の研削実験データを用いて同定する手法の一例を示す。

(1) 奇数の低速安定限界線

心高角 $\gamma=9^\circ$ に設定し、工作物回転速度 n_w を低速から徐々に上げていき最初に自励びり振動を発生する n_w を求める。この自励びり振動を発生した工作物の加工真円誤差を測定し、うねり山数 n を求め、このうねり山数 n が奇数であれば図2のようにこの自励びり振動を発生した点とその

Fig.2 Chatter vibration zone and stable grinding zone

直前の安定研削された点の境界点と原点とを結ぶことにより奇数の低速安定限界線を求めることができる。更に自励びり振動を発生した工作物の $n \cdot n_w$ を計算してこの自励びり振動に関与した固有振動数を求める。これは自励びり振動に関与する最低次の固有振動数である。

ただし、接触変形の大きな調整砥石を用いた場合などでは接触フィルタ効果が顕著になり、うねり山数 n が大きくなる奇数の不安定領域が消失して奇数の自励びり振動を発生しない場合もある。その場合には n_w を低速から徐々に上げていくと最初に偶数の自励びり振動を発生し、偶数の低速安定限界線になる。

(2) 偶数の低速安定限界線

$\gamma=6^\circ$ に設定し、同様に n_w を低速から徐々に上げていき最初に自励びり振動を発生する n_w を求め、また加工真円誤差から n を求め、 n が偶数であれば図2のように原点とを結ぶ線が偶数の低速安定限界線である。また同様に $n \cdot n_w$ を計算して固有振動数を求めると(1)で求めた最低次の固有振動数と同一である。後述の式(1)、(2)に示すように基本的には偶数の低速安定限界線の n_w/γ は奇数のその約2倍である。

次節で述べるように工作物径がやや大きい場合には、研削作業の実用上の制約条件を加味して考察すると低速安定限界線のみを求めれば十分である。これが一番簡易な動力学的安定条件の n_w/γ を求める手法である。

(3) 高速安定限界線

$\gamma=3^\circ$ に設定し、同様に n_w を低速から徐々に上げていき最初に自励びり振動を発生する n_w および n を求め、 n が偶数であることを確認し、この n_w が先に求めた偶数の低速安定限界線より上にあることを確認する。また $n \cdot n_w$ を計算して固有振動数を求める。次に n_w を更に上げていき、自励びり振動が発生するたびに $n \cdot n_w$ から固有振動数を計算する。自励びり振動に関与する固有振動数は、一般には2個程度の場合が多いと思われる。 n_w を更に上げていき、自励びり振動が発生しなくなる n_w を求める。更に n_w を次節で述べる研削周速比を考慮した実用的な範囲の上限近くまで上げて自励びり振動を発生しなければ図2のように原点を通る高速安定限界線が得られる。

ただし、接触変形の大きな調整砥石を用いた場合などでは接触フィルタ効果が顕著になり偶数の不安定領域も消失して偶数の自励びり振動を発生しない場合もある。その場合は、心高角を少し高くして $\gamma=4^\circ$ に設定し、同様の測定を行い高速安定限界線を求める。これで、比較的少数の研削実験データにより低速および高速安定限界線を求めることができる。次に低速および高速安定限界線を比較的少数の研削実験データから求める本手法を、位相合致成円作用安定判別線図を用いて説明する。図3は簡単のため、自励びり振動に関与する固有振動数 f_n は1個のみとし、位相合致成円作用安定判別線図の偶数および奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ の傾きを $\gamma/2$ で近似した場合について、それらと安定限界曲線との関係を示す説明図である。ここで、実線で示す偶数および点線で示す奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ が安定限界曲線のピークと交差をすると自励びり振動を発生する。また安定限界曲線のピークは $n=f_n/n_w$ であり、 n_w が大きくなると右から左に動く。

(1) 奇数の低速安定限界線（図3の(1)に示す。）

n_w が小さいときは安定限界曲線のピークは $n=360^\circ/\gamma$ に対して十分右にあり奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ とも交差しないので

Fig.3 Phase coincidence rounding effect criterion diagram

安定であるが、 n_w が少し大きくなってくると $n=360^\circ/\gamma$ で安定限界曲線のピークと交差するので自励びり振動を発生する。これが先の $\gamma=9^\circ$ の場合から求めた奇数の低速安定限界線となる n_w/γ に対応する。

(2) 偶数の低速安定限界線 (図3の(2)に示す。)

n_w が更に大きくなってくると $n=180^\circ/\gamma$ で偶数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ と安定限界曲線のピークとが交差するので自励びり振動を発生する。これが先の $\gamma=6^\circ$ の場合から求めた偶数の低速安定限界線となる n_w/γ に対応する。ただし、 $\gamma=6^\circ$ の場合は n がやや大きくなり、接触フィルタ効果により奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ は縮小し交差しなくなる。

(3) 高速安定限界線 (図3の(3)に示す。)

更に n_w が大きくなると、偶数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ が安定限界曲線のピークと交差の状態から離れることになり、自励びり振動を発生しなくなる。これが先の $\gamma=3^\circ$ の場合から求めた偶数の高速安定限界線となる n_w/γ に対応する。ただし、 $\gamma=3^\circ$ の場合は n が大きくなり、接触フィルタ効果により奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ は縮小し交差しなくなっており、また偶数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ も縮小し始めるので不安定領域が消失することもある。

接触フィルタ効果を見逃した場合には図3の関係から次の(1)～(3)の式はそれぞれ奇数の低速安定限界線、偶数の低速安定限界線、高速安定限界線の n_w/γ の概略値を与える。

$$\left[\frac{n_w}{\gamma} \right]_{Lo} = \frac{f_n}{360^\circ} \quad (1)$$

$$\left[\frac{n_w}{\gamma} \right]_{Le} = \frac{f_n}{180^\circ} \quad (2)$$

$$\left[\frac{n_w}{\gamma} \right]_H = \frac{f_n}{2\Phi} \quad (3)$$

ただし、自励びり振動に関与する固有振動数は一般には1個だけではなく、低速安定限界線についてはその最低次の固有振動数、高速安定限界線についてはその最高次の固有振動数である。また、式(1)および(2)から自励びり振動に関与する最低次の固有振動数が分かれば偶数および奇数の低速安定限界線となる n_w/γ の概略値を求めることもできる。

ここで、位相合致成円作用安定判別線図を少し変形してより詳細に安定限界曲線の同定を行う方法を説明する。位相合致成円作用安定判別線図では、横軸は n 、縦軸は偏角であるが偶数

Fig.4 Experimental results of stability border line

および奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ は傾きが $\gamma/2$ にほぼ近似できる。この傾きを $\gamma/2$ と近似したときには偶数および奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ の偏角は $n \cdot \gamma/2$ および $-90^\circ + n \cdot \gamma/2$ となる。この線図を横軸を $n \cdot n_w$ とし、縦軸は偏角のままにすると偶数および奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ の傾きは $\gamma/(2n_w)$ である。

図4はこの線図を示しており、横軸に振動数 $n \cdot n_w$ (Hz)、縦軸に偏角をとっている。基本的には研削盤系の動特性である安定限界曲線のピーク部は、横軸の振動数に対して偏角が決まるため、横軸 n の位相合致成円作用安定判別線図とは異なり n_w が変化しても動かなくなる。また、偶数および奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ の傾きは $\gamma/(2n_w)$ である。そして、偶数および奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ と安定限界曲線とが交差すれば自励びり振動を発生することになる。従って、この偶数および奇数の偏角曲線 $\angle\{F(jn)\}$ の傾き $\gamma/(2n_w)$ は、安定限界曲線のピークと交差するかしないかを定めるため安定か不安定かを決定する。この傾き $\gamma/(2n_w)$ は先に安定条件とした n_w/γ に容易に換算することができ、同一の内容を示している。

そこで、各種の心高角および工作物回転速度の組合せで自励びり振動を発生したものについて、工作物の加工真円誤差から n を求め、 $n \cdot n_w$ および $n \cdot \gamma/2$ を計算してプロットしたものを図4上に示す。ただし奇数の場合は $-90^\circ + n \cdot \gamma/2$ である。

図4の実験例では、約100Hz、150Hz、200Hzに固有振動数があり、偏角も読み取れ、調整砥石送り系の約100Hz、研削砥石軸支持系の約200Hz以外に約150Hzの自励びり振動に関与する固有振動数があることが分かった。これは調整砥石ツルイグ用油圧シリンダ支持系の固有振動数であった。

このように、研削実験結果から安定限界曲線のピーク部形状すなわち実験に用いた心なし研削盤の実際に自励びり振動に関与する動特性を同定することができる。また、同定した動力学安定条件および動特性は実際の安定限界そのものを示しており、心なし研削盤の性能評価法としても非常に有効である。例えば、最低次の固有振動数が高いことおよび安定限界曲線のピーク部が縮小していること等は動特性の良い心なし研削盤と評価され、低速および高速安定領域が広いと判断できる。更に、これらから設計指針を得ることもできる。

ただし、心なし研削では自励びり振動は数秒程度で発達するものもあるので自励びり振動の発生を検知したら研削を即時に停止する。研削音や研削力もしくは通し送り分力²⁾等をモニターしながら実験を行うと安全上非常に有効である。

4. 動力学安定条件を満たす設定手法

前節で同定した動力学安定条件 n_w/γ を用い、心高角 γ お

Fig.5 Chatter zone and chatter free zone for $d_w=20\text{mm}$

および工作物回転速度 n_w を研削作業上の制約条件を加味して動力学の安定条件を満たす設定を行う。心高角 γ の設定範囲は心なし研削盤の仕様と工作物の回転安定性などの観点から上限が決まり、また3山、5山等の小さな奇数うねり山の等径歪円を修正する観点から下限が決まるので、ここでは通常の設定範囲に近い $3^\circ < \gamma < 9^\circ$ とする。また、工作物回転速度 n_w の設定範囲は、研削砥石の周速に対する工作物のそれとの比である研削周速比 q を考慮し、加工面粗さなどから適当とされる研削周速比 $q=1/100$ 程度に設定されることが多いので、ここでは通常の設定範囲に近い $1/150 < q < 1/50$ とする。

ここで、調整砥石径： d_t 、調整砥石回転速度： n_t 、研削砥石径： d_s 、研削砥石回転速度： n_s 、工作物径： d_w とすると

$$n_r = q \left(\frac{d_s n_s}{d_r} \right) \quad (4)$$

$$\frac{n_r}{\gamma} = \frac{n_w}{\gamma} \frac{d_w}{d_r} \quad (5)$$

式(4)から研削砥石径 d_s 、研削砥石回転速度 n_s および調整砥石径 d_r が一定であれば調整砥石回転速度 n_t は研削周速比 q によって決まる。図5は、縦軸に工作物回転速度 n_w の代わりに調整砥石回転速度 n_t をとり、横軸に心高角 γ をとって安定および不安定領域を表している。ただし、 $[n_w/\gamma]_{Lo}=0.3$ 、 $[n_w/\gamma]_{Le}=0.6$ 、 $[n_w/\gamma]_H=3$ とし、研削砥石周速 $v_s=n_s \cdot d_s=31\text{m/s}$ 、 $d_t=255\text{mm}$ 、 $d_w=20\text{mm}$ とした場合の計算例を示している。本計算例では $d_w=20\text{mm}$ の場合には安定研削領域が非常に少なくなっていることが分かる。

また、式(5)から安定限界を示す n_w/γ の指標に対して、調整砥石径 d_r を一定とすると、工作物直径 d_w が大きくなると n_w/γ が大きくなるので低速安定領域が拡大し、同様に工作物の直径 d_w が小さくなると n_w/γ が小さくなるので高速安定領域が拡大する。

5. 幾何学/静力学的安定条件を満たす設定手法

幾何学/静力学的安定条件は、前報⁹⁾でも位相合成円作用安定判別線図を用いて確認した。それは、 $\phi_1/\gamma=\text{奇数}=i_o$ となるようにブレード頂角 θ および心高角 γ を設定上の制約条件を加味して選ぶことである。ここで、図1に示す α 、 β は非常に

Fig.6 Diagram for giving conditions of geometrical/statical stability

小さく、最大でも 5° 程度である。従って角度を **radian** 表示した場合には次のように良い精度で近似することができる。

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{2H}{d_r + d_w} \cong \frac{2H}{d_r + d_w} \quad (6)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{2H}{d_s + d_r} \cong \frac{2H}{d_s + d_r} \quad (7)$$

$$\gamma = \alpha + \beta \cong 2H \left[\frac{1}{d_r + d_w} + \frac{1}{d_s + d_r} \right] \quad (8)$$

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2} - \theta - \beta \quad (9)$$

$$\frac{\phi_1}{\gamma} = i_o \quad (10)$$

心高 H は、式(10)に式(9),(8),(7)を代入して H について解いて

$$H = \frac{1}{4} \frac{\pi - 2\theta}{\frac{1}{d_s + d_w} + i_o \left(\frac{1}{d_r + d_w} + \frac{1}{d_s + d_r} \right)} \quad (11)$$

ブレード頂角 θ の設定範囲は、通常 5° おき程度に備えられているものから選ぶことになるが、そのとき工作物の回転安定性の観点からはブレード頂角 θ は大きい方がよいが、 θ が大きくなるとブレードの剛性が低下するため通常は $10^\circ < \theta < 30^\circ$ 程度であり、最大でも 45° 程度までの範囲で設定されている。ここでは工作物の回転安定性を重視して、基本的には $\theta=30^\circ$ を使用することにする。また、心高角 γ の設定範囲については前節の動力学の安定条件のときと同様に $3^\circ < \gamma < 9^\circ$ とする。

図6は横軸に心高角 γ を、縦軸下向きに ϕ_1 をとって $\phi_1/\gamma=$ (奇数) となる条件を示している。 $\phi_1=90^\circ-\theta-\beta$ において $\theta=30^\circ$ とし、また式(7)、(8)より β は心高角 γ に良い近似で比例するので ϕ_1 は図のようになる。また同時に $\phi_1/\gamma=$ (奇数) となる直線群を図上に表示している。そして、丸で示したそれらの交点から $\phi_1/\gamma=$ (奇数) を満足する心高角 γ を求めることができる。 $\theta=30^\circ$ の場合 $3^\circ < \gamma < 9^\circ$ の範囲では $\phi_1/\gamma=$ (奇数) は7~19の奇数である。また心高角 γ より実際の設定に便利な心高 H を式(11) から求

めることができる。

6. 両安定条件を満たす設定手法

図5と図6とを用いて両安定条件を満たす設定手法を説明する。まず動力学的安定条件から心高角 γ を安定な範囲に設定するが、そのとき、幾何学/静力学的安定条件 $\phi_1/\gamma=(\text{奇数})$ となるようにし、同時に心高角 γ を可能な限り $6^\circ\sim 7^\circ$ 近辺に設定する。例えば、図5に示す $d_w=20\text{mm}$ の場合、動力学的安定条件から偶数の低速安定領域を使用することになると、 $\gamma=5^\circ\sim 6.5^\circ$ 位までが動力学的に安定な設定可能範囲である。次に図6に示す幾何学/静力学的安定条件から $\gamma=5^\circ\sim 6.5^\circ$ 位までの範囲では $\phi_1/\gamma=9$ および11が設定可能範囲に入るが、 $\gamma=6^\circ$ 近辺をみると $\phi_1/\gamma=9$ となる γ を設定することができる。

研削条件を設定するときは、式(11)に $i_0=\phi_1/\gamma=9$ を代入して心高 H を求めて設定を行う。また、調整砥石回転速度 n_r は安定領域の上限より余裕をみて少し低めに設定を行う。先に説明したようにブレード頂角 θ は 30° としてある。基本設定 (γ, n_w, θ) または (H, n_r, θ) が決定する。

7. 結 言

本研究では位相合致成円作用安定判別線図に基づいて、実際の動力学的安定条件の同定手法と、実際の研削作業における制約条件を考慮しながら同定した動力学的安定条件と幾何学/静力学的安定条件とを用いて統一的に最適セットアップ条件を設定する手法とを提示した。以下に主な結論を示す。

(1) 安定なセットアップ条件の設定を行うときに最も重要な実際の動力学的安定条件 n_w/γ を比較的少ない研削実験データを用いて同定する手法および研削実験データを用いてより詳細に研削盤の動特性である安定限界曲線を同定する手法を提案した。

(2) この動力学的安定条件の同定手法および研削盤の動特性である安定限界曲線を同定する手法は、心なし研削盤の性能評価法としても非常に有効であり、更にこれらから設計指針を得ることもできることを示した。

(3) 同定した実際の動力学的安定条件 n_w/γ と幾何学/静力学的安定条件 $\phi_1/\gamma=(\text{奇数})$ とを用いて研削作業における制約条件を考慮しながら両安定条件を満足するように統一的にセットアップ条件を設定する手法を提案した。

そして、本設定手法が成円作用最適化の見通しの良い指針になることを示した。

参 考 文 献

- 1) 小川正義, 宮下政和: 心無研削に関する研究 (第1報, 第2報, 第3報, 第4報), 精密機械, **24**, 2 (1958) 89; **24**, 6 (1958) 279; **26**, 3 (1960) 169; **27**, 6 (1961) 421.
- 2) 古川勇二, 宮下政和, 塩崎 進: 心なし研削におけるびり振動, 第1報, 第2報, 日本機械学会論文集, **36**, 282 (1970) 328; **37**, 300 (1971) 1624.
- 3) 宮下政和: 心なし研削加工系の不安定振動解析と安定化対策, 精密機械, **40**, 10 (1974) 865.
- 4) 橋本福雄, 金井 彰, 宮下政和, 森谷 卓, 鳥羽広門: 心なし研削における自励びり振動発達機構と安定化対策 (第1報), 精密機械, **49**, 6 (1983) 715.
- 5) Hashimoto, F., Yoshioka, J., Miyashita, M.: Development of an Algorithm for Giving Optimum Set-up Conditions for Centerless Grinding Operations, 2nd Int grinding Conf., SME/MR86-628, 1986.
- 6) 森谷 卓, 金井 彰, 宮下政和: 一般化心なし研削における成円作用の理論解析, 砥粒加工学会誌, **40**, 5 (1996) 246.
- 7) T.Moriya, A.Kanai, M.Miyashita: Theoretical analysis of rounding effect in generalized centerless grinding, Physics of Machining Process-2, ASME, (1994) 303.
- 8) 森谷 卓, 金井 彰, 宮下政和: 一般化心なし研削における成円作用の解析 (第1報), 精密工学会誌, **68**, 5 (2002) 710.
- 9) 森谷 卓, 金井 彰, 宮下政和: 一般化心なし研削における成円作用の解析 (第2報), 精密工学会誌, **68**, 8 (2002) 1082.