軸対称面の高精度研削に関する研究*

—形状創成の決定メカニズムについて—

榎 本 俊 之** 島 崎 裕*** 谷 泰 弘†

Study on Precision Grinding of Axisymmetrical Form
— Mechanism of Form Generation —

Toshiyuki ENOMOTO, Yutaka SHIMAZAKI and Yasuhiro TANI

In grinding of axisymmetrical surfaces, residual removal increases in peripheral region. Therefore, the surface profile becomes concave and the form accuracy deteriorates. In this paper, the mechanism of generating axisymmetrical form error is made clear by analyzing the change of grinding force. The following facts are revealed by experiments. (1) In case of traversing of a wheel from outer to inner, enormous normal grinding force in the periphery results in large residual removal. (2) Increase in the normal grinding force is considered to be the result from direct contact of bond and workpiece in grinding process. (3) By traversing of a wheel from inner to outer, the form error reduces less than 120 nm p-p.

Key words: axisymmetrical form, precision grinding, form generation, form error, residual removal, traversing direction

1. 緒 言

軸対称面を研削すると、軸中心付近に比較して外周部ほど、目標形状からの削り残し量が大きくなる。そのため、加工面が凹面形状を呈し、形状精度が劣化するという問題が生じている。そこで、形状精度を向上させるために、形状誤差分を補正して再加工する¹⁾ことが行われている。

また、このように加工面形状が凹面に創成される原因としては、工作物の周速度の変化により研削抵抗が変化し、砥石の弾性変形量すなわち逃げ量が増加するためとされている。そこで、研削抵抗を一定にするために砥石のトラバース速度を制御する加工¹⁾も実施されている。

しかし、上述のような方法で0.1 μm レベルの形状精度を得るのは、現状では困難である。これは、研削抵抗と形状創成の関係について定量的な解釈が今までなされておらず、形状創成の機構が不明なためである。

そこで本論文では、加工中の研削抵抗と砥石切込み量との関係を中心に、軸対称面における形状創成機構について検討を行い、その形状創成の決定メカニズムを明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験装置の構成を図1に示す。軸対称非球面の高精度な形状創成を行うには、砥石作用部を加工面に点接触させるほうが適しているため、ここでは砥石スピンドルを工作物に対し45°傾けて、軸付き砥石のエッジ部を加工に用いるようにしている。

砥石の微小切込みには、圧電素子駆動による平行ばね構造の微動工具台を用いた。ここで製作した微動工具台の特性は、ストローク8 μm 、位置決め分解能15 nm、応答周波数55 Hzであった。また、工作物スピンドルは空気静圧軸受、ベルト伝達

によるACモータ駆動、送りテーブルは油静圧軸受、ボールねじ駆動である。砥石スピンドルはエアタービン駆動である。工作物は、ねじでジグに固定され、ジグは永磁チャックにより工作物スピンドルに固定されている。

加工状態をセンシングするために、微動工具台の下に圧電型3分力動力計を設置し研削抵抗を測定した。また、静電容量型非接触変位計により工具台の切込み方向の変位量を、また渦電流型非接触変位計により、砥石軸の水平方向の変位量を測定した。測定データは、ADコンバータを介し、パーソナルコンピュータに取り込み、砥石の変形量や削り量を算出した。

2.2 実験方法

加工実験は、表1に示す条件で行い、工作物回転数、砥石トラバース速度および砥石トラバース方向を変化させて、5通りの加工を行った。

表中にあるように、工作物は超硬合金（超微粒タイプ）の平面とした。第1章で述べたような加工面形状が目標形状に比べ凹面になる傾向は、平面のみならず球面や非球面の加工においても見られる。しかし、球面や非球面の加工においては、加工原点の設定誤差等も形状誤差に影響を及ぼすため、ここでは加

Fig. 1 Outview of the experimental setup

* 原稿受付 平成7年8月11日

** 正会員 (株)リコー生産技術研究所(厚木市下荻野1005)

*** (株)リコー生産技術研究所

† 正会員 東京大学生産技術研究所(東京都港区六本木7-22-1)

Table 1 Grinding conditions

Grinding wheel	SD 3000 N 100 B				
Wheel contact width	110 μm				
Depth of cut	about 1 μm				
Grinding speed	570 m/min				
Workpiece	Tungsten carbide : ϕ 11 mm				
Grinding fluid	Soluble type				
Exp. symbol	A	B	C	D	E
Traverse direction	outer → inner				inner → outer
Workpiece revolution 1/min	200	350	200	350	200
Traverse speed mm/min	5.8	5.8	10.1	10.1	5.8

Fig. 2 Profile of a ground surface (Exp. A)

Fig. 3 Grinding force and surface profile (Exp. C)

工対象を平面に限定した。

工作物の外周に被削性のよいジアリルフタレート樹脂を貼り付け、同時に研削することとした。このことにより、設定切込み量を厳密に把握できるようになった。なお、樹脂の部分を加工作の際、研削抵抗はほとんど発生せず、樹脂は砥石を切り込んだ分だけ削り取られることをあらかじめ確認した。

また削り量、削り残し量を把握するために、加工1パスごとに小型の触針式表面粗さ計を用いて、加工機上で工作物の形状測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 加工結果の一例

研削された加工面形状の一例を図2に示す。加工面外周より砥石をトラバースさせた実験A～Dにおいては、凹面量の大小の差こそあれ、図のように加工面は全体として凹面になっている。特に、外周付近（半径位置3 mmより外）では急激に形状が劣化している。

次に、研削抵抗（法線方向）の測定例を、加工面の形状変化

 Fig. 4 Change of parameter P_3 with radial position

の様子とあわせて、図3に示す。この図より、加工面外周より研削を始めたときに、研削抵抗および削り残し量が最大となり、加工面中心に研削が進むにつれ、研削抵抗は小さくなり、削り残し量も小さくなっていることが分かる。

こうした研削抵抗と削り残し量との関係は、第1章で述べたような、工作物周速度の変化により研削抵抗が変化し、砥石の逃げ量が変化するという考え方により定性的には説明できる。

なお、微動工具台により設定した砥石切込み量と樹脂の削り量とがほとんど同じであったことから、砥石摩耗についてはほとんど無視できる。また、砥石単体の変形量は、砥石設定切込み量と工具台および砥石軸の変位量との差として測定されるが、静電容量型および渦電流型変位計による測定結果から、砥石の変形量に対し砥石軸の変位量および工具台の変形量は、合わせて1/8～1/10程度と非常に小さいことが分かっている。

3.2 研削抵抗と削り量との関係

まず、一般的な理論研削抵抗式に基づき、加工結果を検討する。法線研削抵抗 F_n (N) は、工作物1回転当たりのトラバース量 B (μm)、削り量 t (μm)、工作物速度 V_w (m/min)、砥石速度 V_s (m/min)、定数 P_1, P_2, P_3 を用いて、一般に次式の形で表される²⁾。

$$F_n = P_1 \cdot B \cdot t^{P_2} \cdot \left(\frac{V_w}{V_s} \right)^{P_3} \quad (1)$$

ここで、工作物1回転当たりのトラバース量が砥石幅より小さい場合は、発生する研削抵抗や削り量は砥石幅方向で均一ではないが、砥石形状が特に変化しなければ、研削抵抗は式(1)の形で表すことができる³⁾。

この式(1)に対し、加工面外周より砥石をトラバースさせた実験A～Dの結果を当てはめ、最小自乗法により各定数を求めた。その結果、 $P_2=0.9$ となり、 P_1 は加工パスごとに異なり0.6～1.9の値をとった。しかし、 P_3 は図4に示すように、半径位置により異なる値となり、式(1)では研削抵抗の変化を加工作メカニズム一定の現象として把握するのは困難であることが分かった。

3.3 形状創成メカニズムの検討

以上より、1パス加工中で加工メカニズムが変化、すなわち、砥石作用面の状態が変化していることが考えられる。そこで、砥石作用面状態の変化として、加工進行に伴う砥石切れ味の変化について検討を行う。砥石切れ味は比研削エネルギーや研削2分力比といったパラメータで表すことが試みられており、ここでは加工中の2分力比の変化を示す(図5)。これは

Fig. 5 Change of grinding force and force ratio

加工面外周から研削を始めた実験 C のデータであるが、2 分力比は外周部で急激に変化しており、砥石切れ味が変化していることが分かる。

ここで、砥石切れ味を理論的に説明するために、小林⁴⁾は研削抵抗において砥粒に加わる力と結合剤に加わる力とを区別し、更に砥粒形状を考慮することで、次の研削 2 分力式を得ている。

$$\frac{F_n}{F_t} = \frac{1}{x \cdot a_p / a_n + \mu} \quad (2)$$

ここで、 F_n ：法線研削抵抗、 F_t ：接線研削抵抗、 x ：法線研削抵抗の内、砥粒の受け持つ研削抵抗の割合（他は結合剤が受け持つ）、 a_p ：単粒の接線方向の投影面積、 a_n ：単粒の法線方向の投影面積、 μ ：砥石全体と工作物との摩擦係数

$$\mu = \mu_g \cdot x + \mu_b \cdot (1 - x)$$

μ_g ：砥粒と工作物との摩擦係数

μ_b ：結合剤と工作物との摩擦係数

したがって、図 5 に示すように 2 分力比が加工中変化することは、式 (2) において x 、 a_p 、 a_n のいずれかが変化していることを示す。

一般には、加工進行に伴い砥粒先端が摩耗したり破碎することにより、 a_p や a_n が変化することが考えられる⁵⁾⁶⁾。この a_p や a_n が変化すると、通常は、加工面の表面粗さにも変化が生じるが⁵⁾、本実験においては加工面の内外周での表面粗さの変化は小さく、 a_p や a_n が変化し、研削 2 分力比が変化したとするのには無理がある。

一方、加工後の砥石作用面を観察すると、図 6 のように、結合剤の部分に工作物と擦れた痕が明らかに認められた。このように、加工中、結合剤と工作物とが接触していることから、式 (2) において a_p 、 a_n の変化はあまり無く、 x の値が変化することにより、研削 2 分力比が変化したものと考えられる。こうしたレジノイド砥石における結合剤と工作物との接触については周ら⁷⁾が詳細に検討している。そこでは、粗粒や微粒ではほとんど問題にならなかった砥粒の後退・埋没が、#1500 以上の極微粒のレジノイド砥石では顕著に発生することを指摘している。

3.4 結合剤と工作物との接触に関する検討

ここでは、結合剤と工作物との接触状態の差異により研削抵抗に変化が生じた可能性があるのか、検討を行う。

本来は、ドレス状態が異なる砥石で加工結果を比較すべきだが、#3000 のレジノイド砥石では砥粒の突出し量を制御する

Fig. 6 Grinding wheel surface after machining

Fig. 7 Relationship between grinding force ratio and setting depth of cut

Fig. 8 Force applying during grinding

のが難しいため、設定切込み量を変化させることで、結合剤と工作物との接触状態を変化させることとした。図 7 に、設定切込み量に対する研削 2 分力比の結果を示す。

この図より、設定切込み量が大きく、結合剤と工作物とがより強く接触する場合の方が、研削 2 分力比は大きくなっていることが分かる。この結果を式 (2) で考えることにより、3.3 項で考察したような、加工中の結合剤と工作物との接触の存在がより明らかとなった。

3.5 結合剤と工作物との接触を考慮した形状創成メカニズム

ここでは、結合剤と工作物との接触を考慮することにより、式 (1) における (V_w/V_s) のべき係数 P_3 の変化を説明することができるのか検討する。この P_3 は、3.2 項において形状創成に対し重要であることが判明しているパラメータである。

そこで、図 8 のような砥石と工作物との接触状態を考えるこ

Table 2 Calculated parameters by LSM

$F_n = \lambda \cdot P_1 \cdot B \cdot t^{P_2} \cdot (V_w / V_s)^{P_3} + F_{nb}$				
$F_t = P_1 \cdot B \cdot t^{P_2} \cdot (V_w / V_s)^{P_3} + \mu_b \cdot F_{nb}$				
P_2	0.90			
P_3	1.03			
μ_b	0.13			
Exp. symbol	A	B	C	D
λ	2.3	2.1	2.1	2.2
P_1	0.80	0.75	0.70	0.67
Fitting error $\leq \pm 50$ mN (F_n)				

ととする。この図より、研削抵抗を次のように表せる。

$$F_n = F_{ng1} + F_{ng2} + F_{nb}$$

$$= \lambda \cdot F_{tg1} + F_{ng2} + F_{nb} \quad (3)$$

$$F_t = F_{tg1} + F_{tg2} + F_{tb}$$

$$= F_{tg1} + \mu_g \cdot F_{ng2} + \mu_b \cdot F_{nb} \quad (4)$$

ここで、 F_{ng1} , F_{tg1} ：切削成分、 F_{ng2} , F_{tg2} ：砥粒における摩擦成分、 F_{nb} , F_{tb} ：結合剤における摩擦成分、 λ ：分力比。

これらの諸研削抵抗は、1つの砥粒と結合剤にかかる力ではなく、砥石作用面全体での合計の力を意味する。

ここで、 F_{ng2} は砥粒逃げ面平坦部面積に比例すると考えられる。今回の実験結果においては、3.3項で述べたように、砥粒逃げ面の平坦部面積は加工中ほとんど変化していないことから、 F_{ng2} は加工面の内周、外周にかかわらず、あまり値は変化せず、また F_n が工作物中心でほとんど0になることから、 F_{ng2} はほとんど無視できることになる。また、 F_{tg1} は3.2項の式(1)の形で与えられる。したがって、式(3),(4)は、次のようになる。

$$F_n = \lambda \cdot F_{tg1} + F_{nb}$$

$$= \lambda \cdot P_1 \cdot B \cdot t^{P_2} \cdot \left(\frac{V_w}{V_s} \right)^{P_3} + F_{nb} \quad (5)$$

$$F_t = F_{tg1} + \mu_b \cdot F_{nb}$$

$$= P_1 \cdot B \cdot t^{P_2} \cdot \left(\frac{V_w}{V_s} \right)^{P_3} + \mu_b \cdot F_{nb} \quad (6)$$

式(5),(6)より、

$$F_t = F_{tg1} + \mu_b \cdot (F_n - \lambda \cdot F_{tg1})$$

$$= (1 - \mu_b \cdot \lambda) \cdot P_1 \cdot B \cdot t^{P_2} \cdot \left(\frac{V_w}{V_s} \right)^{P_3} + \mu_b \cdot F_n \quad (7)$$

この式(7)に実験結果を適用し、最小自乗法により各定数を求めた(表2)。なお、 λ は加工面の半径位置3mmより内周では一定となったため、その値を用いた。

表2におけるように、砥石結合剤と工作物との接触部に働く垂直力を考慮することにより、式(1)のように工作物周速度により P_3 が変化することなく、一定値となった。このように、式(5),(6)により研削抵抗の変化を支配している要因を把握することができた。ここで、 μ_b は加工液による潤滑効果により0.1程度になりうることから⁴⁾、表2で得られた $\mu_b = 0.13$ という値は妥当であると考えられる。

次に、図9に法線研削抵抗と式(5)で計算された切削成分を示す。この結果をもとに、軸対称面加工における形状創成のメカニズムを次のように考えることができる。

図9から分かるように、加工面外周より加工を行う場合、外周付近では全研削抵抗における結合剤-工作物間の垂直力が大きな割合を占め、発生する研削抵抗自身も大きい。これは、加

Fig. 9 Change of normal grinding force on traversing from outer to inner

(a) In case of using SD3000N100B

(b) In case of using SD3000N100V

Fig. 10 Comparison of surface profiles when using different kind of grinding wheels

工開始時の最外周では工作物周速度が最も高いため1パス加工中では切削成分が最も大きく、そのため砥粒の結合剤中への後退量も大きくなり、結合剤と工作物とがより強く接触するためと考えられる。そして、砥石が加工面中心に進むにつれ、工作物周速度の減少に従い切削成分は小さくなり、また結合剤がドレスされるため、結合剤と工作物との接触が弱くなり、それら接触部の垂直力が減少していくと考えられる。このような研削抵抗の変化が生じるため、削り残し量も加工面中心付近に比べ、外周部ほど大きくなり、加工面は図2のように凹面形状を呈するものと考えられる。

3.6 砥石結合剤による形状創成の変化

以上の形状創成メカニズムによれば、ビトリファイド砥石による加工では結合剤と工作物とが接触しにくいいため、加工面外周での削り残し量の増大が小さくなるはずである。そこで、レジノイド砥石とビトリファイド砥石による加工を比較することとした(図10)。なお、工作物は光学ガラス(SF11)である。

図10から分かるように、ビトリファイド砥石の加工においては、加工面外周での削り残し量が小さく、形状精度はレジノ

Fig. 11 Profile of a ground surface (Exp. E)

Fig. 12 Change of normal grinding force on traversing from inner to outer

イド砥石による加工面よりも高い精度となっている。なお、表面粗さについては、レジノイド砥石で $20 \sim 50 \text{ nmR}_y$ 、ビトリファイド砥石で $60 \sim 100 \text{ nmR}_y$ であった。

3.7 内周から外周へ砥石をトラバースさせた研削

3.5 項で考察した形状創成メカニズムによれば、加工面中心より外周へと砥石をトラバースさせることにより、加工面外周部での削り残し量の増大を抑制できると考えられる。すなわち、加工面中心より加工を行う場合、発生する研削抵抗は最初小さく、結合剤と工作物との接触もほとんど無いと考えられる。その後、砥石が外周へとトラバースするにつれ研削抵抗は大きくなっていくが、結合剤と工作物とは徐々に接触していくため、その都度研削抵抗により結合剤は脱落を生じ、最外周まで加工した場合も、結合剤と工作物との大規模な接触は発生しない。したがって、加工面外周部でも研削抵抗は急激に増加せず、削り残し量の増大も抑制できると期待される。

そこで、加工面中心より外周へ砥石をトラバースさせる加工（実験 E）を実施した。他の加工条件は表 1 に示すように実験 A と同一である。その結果、図 11 に示すような、平面度 $PV 74 \text{ nm}$ という非常に高い形状精度の加工面が得られた。なお、5 回の加工の最大値においても $PV 120 \text{ nm}$ であった。また、法線研削抵抗と式 (5) で計算された切削成分を図 12 に示す。図 9 と比較して、加工面全体で摩擦成分が小さく、加工面外周部でも研削抵抗は急増していないことが分かる。更に、研削 2

Fig. 13 Comparison of grinding force ratio when traversing in different direction

分力比については図 13 のようになった。加工面外周から加工する実験 A では外周部で 2 分力比は大きくなっており、砥石切れ味が低下しているものの、中心から加工する実験 E では加工面全周にわたり 2 分力比は一定となっており、砥石切れ味が変化していないことが分かる。

このように、加工面中心より砥石をトラバースさせることにより、砥石切れ味を変化させず、高精度な形状精度が得られることが分かった。

4. 結 言

軸対称面研削における形状創成機構を検討した結果、以下のことが判明した。

- (1) 加工面外周から加工を始める場合、外周部では、砥石結合剤と工作物とが強く接触するため、発生する研削抵抗も大きくなる。したがって、外周付近での削り残し量が大きくなり、加工面が凹面形状となる。
- (2) 加工面中心より砥石をトラバースすることにより、砥石結合剤と工作物との接触はほとんど起こらず、 $PV 120 \text{ nm}$ 以下の高精度な平面が得られる。
- (3) 砥石結合剤と工作物とが接触しにくいビトリファイド砥石はレジノイド砥石に比べ、加工面外周での削り残し量が大きくならず、より高い形状精度が得られる。

参 考 文 献

- 1) 鈴木浩文, 小寺 直, 中筋智明, 長谷川 森, 原 成一: 非球面研削に関する研究——砥石走査速度制御による高精度加工, 1994 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1994) 799.
- 2) 小野浩二: 研削仕上, 槇書店, (1962) 22.
- 3) 精密工学会編: 研削工学, オーム社, (1987) 26.
- 4) 小林 昭: 研削抵抗の定性的説明, 精密機械, 26, 2 (1960) 83.
- 5) 海野邦昭, 篠崎 襄: 砥石作動面劣化過程の研削抵抗解析による考察——研削砥石の磨耗と寿命に関する研究 (第 1 報), 精密機械, 42, 4 (1976) 299.
- 6) 島宗 勉, 小野浩二: 砥石寿命に関する研究 (第 1 報)——研削抵抗の時間的変化, 精密機械, 46, 11 (1980) 1379.
- 7) 周 立波, 厨川常元, 庄司克雄: 極微粒ホイールのツルーイング, ドレッシング及び研削特性, 砥粒加工学会誌, 36, 4 (1992) 239.