研 究

プランジ研削における砥石の接触状態に関する研究（第2報）*

——研削加工面の生成に関与する切れ刃の連続間隔——

中 島 利 勝** 中 川 平 三 郎** 柳 本 剛***

Interference Condition of Wheels in
Plunge Grinding (2nd Report)
—Successive Spacing of Cutting Edges
related to Surface Generation—

Toshikatsu NAKAJIMA, Heisaburo NAKAGAWA
and Tsuyoshi YANAGIMOTO

The successive spacing and its distribution of cutting edges related to surface generation are experimentally made clear by analyzing interference grooves on ground surface and correlating the grooves with the position and the shape of cutting

edges on the wheel surface. The finished surface is generated with a period of the grinding wheel revolution by a few cutting edges on the wheel surface. The successive cutting edge spacing distributes widely, following the Gamma Distribution. The successive cutting edge spacing has a close relation to the real interference depth of wheel and is longer than the one determined by analyzing only the wheel surface.

Key words: plunge grinding, successive cutting edge spacing, cutting edge distribution, interference groove, surface generation.

1. 緒 言

研削加工は、砥石作用面上に分布している数多くの砥粒切れ刃が工作物と干渉する結果として進行する。この場合、砥粒切れ刃は形状や寸法が不均一で、砥石作用面上に不規則に分布し、異なる剛さで弾性的に支持されている。従って研削現象を解明するためには、個々の切れ刃の形状と寸法、相対位置関係(分布)、切れ刃支持剛性などを明らかにしなければならない。例えば、研削現象を考察する上で基礎となるのは、一つの砥粒切れ刃が生成する切りくずの幾何学的形状であり、それは工作物と砥石との速度比と半径比、設定砥石切込み量および連続切れ刃間隔で決定される¹⁾。また砥粒切れ刃の切削現象が過渡的切削過程である²⁾³⁾という観点から、実際の切りくず形状を決定するためには、上記の諸量に加えて実砥石干渉量、切れ刃支持剛性などが重要な値となる。

このように、砥石作用面上に存在する砥粒切れ刃の形状、寸法、分布、支持剛性などは研削現象を本質的に支配する重要な値であるが、その測定の困難さのために十分に解明されているとはいえない。そこで本報告においては、上記の値のうち連続切れ刃間隔に焦点を絞り、その分類をすると共に研削加工表面に残された干渉みぞ

を解析することにより、砥石作用面上に存在する砥粒切れ刃のうちで研削加工面の生成に関与する切れ刃の連続間隔を決定し、その分布とそれに及ぼす種々の要因の影響を明らかにする。

2. 連続切れ刃間隔の定義とその測定方法

連続切れ刃間隔は、砥石の軸直角断面における連続する二つの砥粒切れ刃間の砥石作用面上での円周方向の長さである。しかし、砥石作用面上に存在する二つの砥粒切れ刃が連続しているかどうかは、砥粒切れ刃の干渉幅によって決まり、従って連続切れ刃間隔は、砥石の種類、ドレッシング条件のみならず、その他の研削条件によっても影響されることになる。また、砥石作用面上で三次的に分布している砥粒切れ刃には、工作物と弾性的のみ干渉するもの、塑性変形によってみぞを生成するものおよび切削作用によって切りくずを生成するものが混在し、後者二つのものについては、さらに研削加工面に干渉みぞを残すものと残さないものと分けられる。

従って、連続切れ刃間隔としては、次の三つの値が定義される。

- (1) 工作物と干渉するすべての砥粒切れ刃の連続間隔 δ_i
- (2) 工作物の切削あるいは塑性変形に関与する砥粒切れ刃の連続間隔 δ_a
- (3) 工作物の切削あるいは塑性変形に関与する砥粒切れ刃のうち、その干渉みぞを研削加工面に残す砥粒

* 原稿受付 昭和55年2月20日、昭和54年度精機学会広島地方学術講演会(昭和54年12月13日)にて発表。

** 正会員 岡山大学工学部(岡山市津島中3-1-1)

*** 正会員 日本オイルシール工業(株)(藤沢市辻堂新町4-3-1)

図1 工作物表面の三次元測定装置

切れ刃の連続間隔 δ_s 。

ここで δ_s は表面粗さを, δ_a は加工変質層などを, δ_i は研削熱や研削抵抗などを考察する場合にそれぞれ重要になると考えられる。工作物と干渉するすべての砥粒切れ刃の連続間隔 δ_i については, 数多くの研究者によって, 砥石作用面を転写もしくは直接粗さ計等で測定する静的方法^{4)~6)}, 研削中に工作物と実際に干渉した切れ刃を熱電対⁷⁾⁸⁾ や圧電素子⁹⁾ で測定する動的方法などで測定され検討されている。ここでは, 研削加工面上の干渉みぞの解析と砥石作用面上に存在する砥粒切れ刃の形状と位置の測定から, 研削加工面の生成に關する砥粒切れ刃の連続間隔 δ_s を決定した。

図1は, 工作物表面の干渉みぞを三次元的に測定するための装置を示す。研削後, 工作物を研削加工時と同じ状態で両センタ間に支持し, シンクロナスマータとタイミングベルトによって25 min で1回の超低速回転をさせ, 研削加工面の円周方向の断面形状を触針式表面検査機で測定した。また干渉みぞ形状を三次元的に把握するために, 工作物支持部全体をリニアベアリングに載せ, 微動送り機構により工作物軸方向にも1 μm 単位で移動させ, その移動量を電気マイクロメータで検出した。

図2は, 砥石作用面上に存在する砥粒切れ刃の位置と形状を測定するための装置を示す。砥石軸は静圧軸受になっているために回転トルクが非常に小さく, シンクロナスマータで滑らかに砥石を回転させることができ, 研削加工時と同じ状態で砥石作用面の測定が可能である。砥石の回転数は測定精度の点から6/500 rpmに設定し, 砥粒切れ刃の位置と形状は触針式表面検査機とステレオ顕微鏡によって, 同時に測定および観察を行った。図中のマーカは, 砥粒切れ刃の位置と高さを測定する時の基準となるもので, 厚さ10 μm のフィラゲージを砥石作用面上に貼付したものである。また砥粒切れ刃の形状を三次元的に把握するために, 表面検査機の検出部とステ

図2 砥石作用面の三次元測定装置

レオ顕微鏡が載っているテーブルを軸方向に2 μm ずつ移動させた。以上のように, まず工作物表面の干渉みぞの形状を明らかにし, 次にそのみぞを生成した砥粒切れ刃の位置と形状を対応させて解析することにより, 研削加工面の生成に關する砥粒切れ刃の連続間隔が決定できると考えられる。

3. 実験方法

研削加工実験は, 円筒プランジ研削方式で行い, 砥石台移動量, 寸法生成量, 研削背分力および砥石摩耗を測定すると共に, 定常研削状態で砥石台を急速後退させて得られた工作物表面の干渉みぞの三次元的形状とこれらのみぞを生成した砥粒切れ刃の位置と形状を決定することによって連続切れ刃間隔を明らかにした。なお砥石台移動量および工作物半径減少量は電気マイクロメータにより, 研削背分力は工作物支持センタに貼ったひずみゲージにより検出した。砥石摩耗量は, 砥石作用面をプラスチック板に転写した後触針式表面検査機で測定した。研削加工条件は次のようである。

研削方式: 円筒プランジ研削

研削砥石: WA 36 L 9 V ($\phi 400 \times 50 \text{ mm}$)

工作物: SK 3 ($\phi 120 \times 30 \text{ mm}$, $H_v = 470 \pm 20$)

砥石速度: $V_s = 45 \text{ m/s}$

速度比: $K_v = V_w/V_s = 0.00481$

研削系剛性: $k_{sy} = 0.985 \text{ kg}/\mu\text{m}$

研削幅: $B = 30 \text{ mm}$

研削液: ソリュブル型研削油

ドレッシング: 切込み 20 $\mu\text{m} \times$ 送り 0.2 mm/rev
of G. W.

4. 実験結果および検討

4.1 工作物断面形状

図3は, 定常研削状態における工作物軸直角断面形状の記録例を示す。図(a)よりわかるように, 工作物軸直

図3 工作物円周方向断面形状の記録例

角断面形状は周期的であり、その周期 $\overline{AB}$, $\overline{BC}$ などは、工作物と砥石との速度比および砥石直径によって決定される砥石1回転が工作物を研削した長さとも一致している。図(b), (c)は、 $\overline{AB}$ と $\overline{CD}$ を円周方向に拡大したもので、両断面形状はほぼ等しい形状をしている。これらのことより、砥石摩耗量が非常に小さい短時間の研削を考えると、研削加工面は、砥石作用面上の幾つかの砥粒切れ刃が、砥石1回転の周期で周期的に工作物と干渉することによって生成されることがわかる。すなわち、工作物断面形状は幾つかの曲線群から形成されており、これらの曲線は、工作物と砥石との幾何学的干渉条件より決定される砥粒の軌跡（トロコイド曲線）の一部でよく近似できるから、これらの曲線は幾つかの砥粒切れ刃が生成した干渉みぞと考えられる。従って、研削加工面の生成に関与した砥粒切れ刃の連続間隔は隣接する曲線の間隔を解析することによって求められる。また過渡、スパークアウト研削状態あるいはプランジ速度が小さくて、工作物1回転当たりの寸法生成量が表面粗さよりも小さくなる場合には、工作物1回転前に生成された干渉みぞと新しいものとが混在する。このような場合にも、砥石台を急速後退させた時に、砥石が接触し

図4 工作物表面の干渉みぞの形状

ていた工作物表面の前後の断面形状を測定することによって新旧のみぞの区別ができ、連続切れ刃間隔は決定できる。

4.2 砥粒切れ刃と工作物表面の干渉みぞとの対応

図4は、砥石約1回転で生成された工作物表面の干渉みぞ形状の平面図とA-A, B-Bの断面形状の記録例を示す。図において、各干渉みぞ中の研削方向に平行な線は、その干渉みぞの谷底の軌跡を示し、幅方向に平行な線は、砥粒切れ刃が最も深く切込んだ位置を示しており、従って直線の交点が干渉みぞの最も深い点となる。図よ

図5 表面生成に関与する砥粒切れ刃の位置とその形状

りわかるように、工作物表面は大小様々なみぞから成り立っており、砥石作用面上に存在する砥粒切れ刃の形状と分布がかなり複雑であることがわかる。

図5は、直線 A-A に接する干渉みぞ b, d, e, f を生成した砥粒切れ刃の位置と形状を示す。二重丸の切れ刃が同記号の干渉みぞを生成しており、他の切れ刃は、各々の位置と高さから考えて、塑性変形あるいは切削による干渉みぞを作るが、そのみぞは工作物表面に残らないと考えられる砥粒切れ刃である。砥粒切れ刃の形状は $1\mu\text{m}$ 単位の等高線で表し、図中の数値はある任意の位置からの最大高さを示す。さらに砥粒切れ刃 b, i, e, f の顕微鏡写真を示す。まず砥粒切れ刃 b, d, e, f の相対位置関係については、各々の干渉みぞの間隔、速度比および砥石直径から決定される砥石作用面上に存在すべき位置に、これらの砥粒切れ刃は存在しており、干渉みぞとそれを生成した砥粒切れ刃との 1 対 1 の対応が可能であり、研削加工面の生成に関与する砥粒切れ刃の連続間隔が決定で

きる。また砥粒切れ刃形状については、砥粒 a は、等高線が粗になっており先端が平らであるし、砥粒 c は、先端の鋭いしかも円すい形に近いもの、砥粒 B は、細長く一つの砥粒に二つの切れ刃が存在することなども明らかになった。

図6は、定常研削状態において工作物表面に残る干渉みぞの幅、すなわち加工面の生成からみた砥粒切れ刃の平均作用幅の分布を示す。干渉みぞの幅は $10\mu\text{m}$ 以内のものが大部分を占めているが、かなり幅広いものも存在していることから、みぞの

幅は非常に不均一であることがわかる。またみぞの平均幅は $6\mu\text{m}$ 強である。

図7は、工作物表面上で最も深いみぞを基準にした干渉みぞの高さの分布を示す。図よりわかるように、その高さは均一ではなく、その分布はガンマ分布でよく近似できる。但し、図中の σ は標準偏差、 k は形のパラメータ、 α は尺度パラメータを表す。

4.3 連続切れ刃間隔と砥粒切れ刃の深さ分布

砥粒切れ刃は、砥石作用面上で三次元的に不規則な分布をしているために、連続切れ刃間隔も幅広く分布していると考えられる。図8は、研削加工面の生成に関与する砥粒切れ刃の連続間隔 $\bar{\delta}_s$ の頻度と累積頻度を示す。連続切れ刃間隔は、その定義から砥石円周長さ以内の値を取りうるが、実際には干渉みぞの記録例からも明らかにように、非常に短いものからかなり長いものまで幅広く分布し、平均連続切れ刃間隔 $\bar{\delta}_s$ に対して、頻度が最も多い間隔は $\bar{\delta}_s$ よりも短いところに現れて、標準偏差も大

図6 干渉みぞの幅の分布

図7 干渉みぞの高さの分布

図8 連続切れ刃間隔の分布

図9 砥石半径方向の砥粒切れ刃の分布

きい。このことから連続切れ刃間隔の分布形はガンマ分布でよく近似されうる。

図9は、砥石作用面上を触針式表面検査機で測定することによって決定した、砥石半径方向の砥粒切れ刃の分布を示す。図よりわかるように、砥粒切れ刃数はある深さまでは増加していき、それより深く砥石内部に入ると、逆に減少する傾向にある。またその分布形は正規分布でよく近似されうる。

4.4 連続切れ刃間隔に及ぼすプランジ速度の影響

研削加工面の生成に及ぼす砥粒切れ刃の連続間隔の測定が可能となり、間隔の分布も明らかになったので、次にこの連続切れ刃間隔に及ぼす要因について検討をす

図10 平均連続切れ刃間隔とプランジ速度との関係

図11 実砥石干渉量とプランジ速度との関係

る。

図10は、定常研削状態において、研削加工面の生成に及ぼす砥粒切れ刃の平均連続間隔 $\bar{\delta}_s$ に及ぼすプランジ速度 v_p の影響を示す。プランジ速度が大きくなる程平均連続切れ刃間隔は短くなり、研削加工面の生成に及ぼす砥粒切れ刃が増えていることがわかる。この理由として、次のようなことが考えられる。

図11は、定常研削状態における実砥石干渉量 $d_s(t_s)$ およびそれを構成する工作物1回転当たりの有効設定砥石切込み量 d' 、接触剛性に起因する切残し量 d_2 および仕上面粗さに起因する切残し量 d_3 とプランジ速度 v_p との関係を示す。図よりわかるように、プランジ速度が大きくなるに従って工作物1回転当たりの有効設定砥石切込み量、接触剛性に起因する切残し量および仕上面粗さ

図 12 平均連続切れ刃間隔と実砥石干渉量との関係

図 13 連続切れ刃間隔の分布形に及ぼすプランジ速度の影響

に起因する切残し量が増加し、その結果として実砥石干渉量が増加する。ここで、工作物材質は一定であるから、工作物の弾性回復量を一定と考えると、接触剛性に起因する切残し量の増加は、砥粒切れ刃の変位が大きくなることを意味し、その結果、プランジ速度が小さい時に研削加工面の生成に関与しなかった砥粒切れ刃が、プランジ速度の増加によって、工作物表面に干渉みぞを残すようになると考えられる。

図 12 は、平均連続切れ刃間隔 $\bar{\delta}_s$ と実砥石干渉量 $d_s(t_s)$ との関係を示す。図よりわかるように、平均連続切れ刃間隔は実砥石干渉量と直線関係にあり、実砥石干渉量が増加するに従って平均連続切れ刃間隔は短くなっている。上に述べたことより、平均連続切れ刃間隔は実砥石干渉量と密接な関係を有していると考えられる。

図 13 は、プランジ速度 v_p を変化した時の連続切れ刃間隔 δ_s の分布形状を示す。プランジ速度すなわち実砥石干渉量が大きくなるに従って、密度関数のピーク的位置が、連続切れ刃間隔の小さい方に移り、その点での

確率も大きくなることがわかる。

5. 結 言

連続切れ刃間隔は、研削現象を支配する一つの重要な値である。本報告では、工作物の研削方向断面形状、干渉みぞの三次元的形状とこのみぞを生成した砥石作用面上の砥粒切れ刃の位置と形状および分布を測定することによって、研削加工面の生成に関与する砥粒切れ刃の連続間隔について検討した。主な結論は次のようである。

- (1) 研削加工面の干渉みぞの三次元的形状とそのみぞを生成した砥粒切れ刃との対応から、研削加工面の生成に関与する砥粒切れ刃の連続間隔が決定できる。
- (2) 工作物表面の研削方向断面形状は、砥石の回転周期に同期した形状となり、研削表面はごく少数の砥粒切れ刃によって生成される。
- (3) 研削加工面の生成に関与する砥粒切れ刃の連続間隔の分布は、ガンマ分布によって近似できる。
- (4) 研削加工面の生成に関与する砥粒切れ刃の連続間隔は、実砥石干渉量と密接な関係を有し、実砥石干渉量が大きくなる程研削加工面の生成に関与する砥粒切れ刃数が増え、連続切れ刃間隔は短くなる。
- (5) 研削加工面の生成に関与する砥粒切れ刃の連続間隔は、砥石作用面の解析から得られたものに比べてかなり異なる。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金によって行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 岡村健二郎, 中島利勝, 上田 稔, 内田恒二: 砥粒切れ刃による切削現象の研究 (第 1 報), 精密機械, **32**, 4 (1966) 287.
- 2) 岡村健二郎, 中島利勝, 平 邦昭, 藤原煥三: 砥粒切れ刃による切削現象の研究 (第 4 報), 精密機械, **33**, 3 (1967) 161.
- 3) 岡村健二郎, 中島利勝, 山本紀一郎: 砥粒切れ刃による切削現象の研究 (第 5 報), 精密機械, **33**, 4 (1967) 237.
- 4) 田中義信, 津和秀夫, 河村末久: 研削加工の諸条件が研削砥石の性能に及ぼす影響について (第 2 報), 精密機械, **30**, 12 (1964) 10.
- 5) 竹中規雄, 笹谷重康: 研削作用に関する研究 (第 2 報), 日本機械学会論文集, **26**, 163 (1960) 403.
- 6) 津和秀夫: 研削における砥粒の挙動について (第 2 報), 精密機械, **27**, 6 (1961) 409.
- 7) 玉井廉人, 河村末久, 寺田勝三: 研削中における砥石切れ刃高さの分布について, 精密機械, **36**, 4 (1970) 263.
- 8) 牧野秀一, 須藤徹也, 福島英一: 研削過程の実験的追究について, 機械試験所報, **20** (1966) 1, 11.
- 9) 松井正己, 生司克雄: 統計的手法による研削機構の考察 (第 3 報), 精密機械, **37**, 10 (1971) 708.