トラバース研削における形状生成過程*

岡村 健二郎** 中川 平三郎*** 原 宣 宏†

Traverse Grinding of Cambered Cylindrical Workpiece

Kenjiro OKAMURA, Heisaburo NAKAGAWA and Nobuhiro HARA

The purpose of the paper is to theoretically calculate infeed of grinding wheel for forming a cambered workpiece such as roll in traverse grinding. The infeed of grinding wheel has been analyzed considering various residual stock removals, wheel wear, the profile change of cutting surface of wheel caused by wheel wear. Then it is made clear that cambered workpiece can be ground with NC-grinding machine. The distributions of stock removal rate, grinding force and wheel wear rate on cutting surface of wheel are calculated.

Key words: traverse grinding, roll grinding, infeed control, cambered workpiece

1. 緒 言

研削加工によって、工作物を直円筒形以外の形状に仕上を行う方法としては、砥石作用面を目的の形状に成形して行う総形研削あるいはアングル研削が考えられる。しかし圧延ロールのように、工作物が砥石幅よりも長い場合には、トラバース研削に頼らざるをえない。ところがトラバース研削では、砥石に工作物軸方向の相対運動を与えるため、砥石作用面の幅方向位置によって研削作用が異なり、これに伴って砥石幅方向で砥石摩耗量が異なるために、砥石作用面形状も時々刻々と変化する。その結果として作用面上の各位置における研削現象値は複雑に変化する¹⁾。主にこのような理由から、トラバース研削で工作物を任意の形状や所定の寸法に仕上げるための、砥石台の切込み量を理論的に求めることは困難とされてきた。

本報告では、今までに行ってきたトラバース研削機構の解明¹⁾²⁾と研削現象値の定式化³⁾を基に、トラバース研削で円筒形以外の形状に工作物を仕上げるための砥石台切込み量を求め、数値制御研削盤で理論的に形状生成が可能なことを示す。また具体例として、圧延ロールの再

研削を想定したシミュレーションも行う。

2. トラバース研削過程の基礎式

トラバース研削は、工作物1回転当たりの砥石トラバース量に相当する研削幅(ステップ幅)を持つプランジ研削の集合体と考えれば、一つのステップについてはプランジ研削における基礎関係式⁴⁾がそのまま適用できる。この考え方によるモデルでの直円筒トラバース研削の数値計算値と実験値との比較を行った結果よい一致が得られた⁵⁾。

砥石と工作物の基本干渉モデルを示すと、図1のようになり、各ステップで次の関係式が成り立つ。

$$\Delta(n) = \Delta_r - d_1(L) - d_0(n) - R(n-1) \quad (1)$$

$$d_r(n) = \Delta(n) - \Delta R(n) \quad (2)$$

$$\Delta R(n) = c\{\Delta(n) - (d_r)_i\} \quad (3)$$

Fig. 1 Accumulation phenomenon in traverse grinding

* 原稿受付 昭和61年12月4日、昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和60年10月15日)にて発表

** 正会員 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)

*** 正会員 ファインセラミックスセンター(名古屋市中熱田区六野2-4-1)

† 正会員 (株)神戸製鋼所(神戸市中央区脇浜町1-3-18)

$$\left. \begin{aligned} d_0(n) &= \gamma \cdot \Delta R(n) \cdot V_w \\ d_0(n) &= \gamma \cdot \Delta R(n) \cdot V_w + (d_0)_c \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(異常摩耗領域)

$$\left. \begin{aligned} p(n) &= V_w \cdot f\{\alpha \cdot d_r(n) + \beta \cdot \Delta R(n)\} \\ p(n) &= V_w \cdot f\{\alpha \cdot d_r(n) + \beta \cdot \Delta R(n)\} + p_c \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(異常摩耗領域)

$$P = \sum p(n) \quad (6)$$

$$d_1(L) = p/k_{sv}(L) \quad (7)$$

ここで $\Delta(n)$, $d_r(n)$ は第 n ステップの実砥石干渉量および切残し量, Δ_r は設定砥石切込み量, $d_1(L)$ は研削系の剛性に起因する切残し量, $d_0(n)$ は第 n ステップの砥石摩耗量, $R(n-1)$ は第 $(n-1)$ ステップ目までの累積寸法生成量, $\Delta R(n)$ は第 n ステップでの寸法生成量である. c は寸法生成率, γ は砥石摩耗速度係数, V_w は工作物周速度, $p(n)$ は第 n ステップの研削背分力, α は接触剛性, β は切削剛性, P は総研削背分力, $k_{sv}(L)$ は工作物の一端からの距離 L での研削系剛性である. 式 (1) ~ (7) からわかるように, 研削特性値 $c, \alpha, \beta, \gamma, k_{sv}$ が決定されれば, 研削現象値は容易に計算できる.

3. 研削特性値の実験的検討および実験方法

一般にトラバース研削では, 砥石の前端部で実砥石干渉量が大きく, 金属除去の大部分を受け持つ. そのために砥石作用面前端部は厳しい条件下にさらされ, 砥石摩耗が砥粒の脱落や破壊によってなされる場合がある. このような場合には, 砥石作用面の状態は, ドレッシング後の状態と比較して, 著しく荒れる. 砥石作用面への負荷が軽減されてもドレッシング後の状態に戻ることはない. したがって, 研削特性値は砥石作用面への負荷状態の履歴で変化すると考えるべきである. そこで次の三つの状態に分けて研削特性値を求めた. (a) 摩滅摩耗領域で研削を行う場合, (b) 破壊・脱落摩耗領域で研削を行う場合, (c) 一度破壊・脱落摩耗をした後に摩滅摩耗領域で研削する場合.

3.1 実験方法

研削特性値を求めるための研削実験は, トラバース研削の各ステップがプランジ研削と同等であると考えて, 以下に示す研削加工条件で行った.

研削方式: 円筒プランジ研削

研削砥石: WA 60 L 8 V (ϕ 300×38 mm)

工 作 物: S 45 C (ϕ 120×5 mm)

砥石周速度: $V_s = 1560$ m/min

速 度 比: $K_v = V_w / V_s = 0.015$

研 削 幅: $B = 10$ mm

砥石軸系剛性: $k_s = 34.5$ MN/m

Fig. 2 Schematic illustration of experimental set-up

Fig. 3 Relationship between wheel wear rate and stock removal rate

工作物系剛性: $k_w = 13.7$ MN/m

研 削 液: 水溶性研削液 JIS W 2-2 号

ドレッシング条件: 切込み 10 mm×送り 0.1 mm/rev of G. W.

図 2 に, 実験装置の概要を示す. 研削背分力は両センタに貼ったひずみゲージで, 砥石台移動量と寸法生成量は電気マイクロメータでそれぞれ検出した. 砥石摩耗量は, 砥石作用面をアクリル板に転写して, それを表面検査機で測定して決定した.

3.2 研削特性値

図 3 は, 単位幅, 単位時間あたりの実研削量 $\Delta R \cdot V_w$ に対する砥石摩耗速度を示す. 破線は, ドレッシングを行ってから研削した場合, 実線および一点鎖線は一度破壊・脱落摩耗した砥石を用いて, 摩滅摩耗領域で研削を行った場合の砥石摩耗速度を示す. 実切削量が約 $7 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ 以上の領域で破壊・脱落摩耗した砥石を用いた場合には, 実切削量が減少していくと実線で示した摩耗速度になる. 約 $5.7 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ 以上, 約

Fig. 4 Relationship between normal force and stock removal rate

Table 1 Grinding coefficients in three states

Wear	I	II	III
C mm/mm	0.90	0.78	0.88
α N·s/mm ³	0.45	0.43	0.44
β N·s/mm ³	3.63	1.03	2.75

7 mm³/mm·s 以下で破壊・脱落摩耗した場合には、実線と破線の間値を取る。すなわち一点鎖線の値をとる。

図4は、研削背分力と実切削量との関係を示す。図3の砥石摩耗速度の変化と対比させて考えると、摩滅摩耗領域における背分力は実切削量にほぼ比例しているが、破壊・脱落摩耗領域に入ると、背分力の増加割合が小さくなる。一度破壊・脱落摩耗した後に、実切削量が小さくなって、砥石が摩滅摩耗をするようになっても、研削背分力は所定のドレッシング後の値と比較して小さい。このことは砥石が破壊・脱落摩耗することによって、作用面が荒れた状態になるためである。このように研削背分力も砥石作用面の状態に変化する。

表1は、寸法生成率 c および研削背分力より計算して求めた接触剛性 α と切削剛性 β を示す⁴⁾。表中のIが摩滅摩耗領域、IIが破壊・脱落摩耗領域、IIIが実切削量が約7 mm³/mm·s以上で一度破壊・脱落摩耗した後の摩滅摩耗領域での値である。接触剛性にはあまり大きな変化がみられないが、それでも破壊・脱落摩耗領域では小さくなる。切削剛性は、砥石の摩耗形態によって大きく変わり、破壊・脱落摩耗領域でかなり小さい。寸法生成率も変化は少ないが、砥石作用面が荒れると切れ刃の支持剛性が低下したり、表面粗さに起因する切残し量が大きくなるために小さく考えられる。実切削量 $\Delta R \cdot V_w$ が5.7 mm³/

mm·sから7.0 mm³/mm·sの範囲内で、一度破壊・脱落摩耗をして摩滅摩耗領域に入ると、研削特性値は表に示すIとIIIの間値をとる。さらに、工作物上の研削系剛性 $k_{st}(L)$ は力学計算より求めることができる³⁾。

以上の実験によって、各研削特性値が、砥石作用面の状態によって変化することが明らかになった。これらの研削特性値を式(1)から式(7)に代入すれば、各ステップの研削現象値が求められ、各ステップの総和を求めることによって全体の研削系かつぎ量、寸法生成量、研削背分力が計算できる。そして、工作物の目標形状寸法とこれらの研削現象値とを考え合わせれば、砥石台切込み量が決定できる。

4. 任意形状生成過程の解析

4.1 砥石と工作物との干渉状態

研削の進行に伴って変化する砥石作用面形状と工作物の目標寸法から考えて、トラバース中に砥石切込み量を変化させるので、砥石と工作物との間の幾何学的干渉は複雑になると考えられる。

図5は、砥石と工作物の干渉状態を示す。工作物1回転当たりのトラバース量(ステップ幅)で、砥石と工作物を軸方向に分割して考える。図(a)の*i*番目まで形状が仕上がっていて、次に(*i*+1)番目を仕上げるものとする。トラバース研削では、砥石が階段状に

Fig. 5 Condition of geometrical interaction between grinding wheel and workpiece

Fig. 6 Flow chart for determining infeed

摩耗するために、工作物との幾何学的干渉には様々な形態が考えられる。すなわち (i) 図 (b) のように切り込んで行くと、図 (c) のように既に仕上がっている $(i-1)$ 番目を削ったり、これから仕上を行おうとしている $(i+2)$ 番目を削り過ぎてしまうことが起こる。このような場合には、すべてのステップで削り過ぎが起こらないように砥石台を後退させて、 $(i+1)$ 番目は後続のステップで仕上を行う。(ii) 図 (d) のように、 $(i+1)$ 番目が目標寸法値になる場合には次の段階に進む。(iii) 図 (e) のように、 $(i+2)$ 番目まで仕上がるときには、 $(i+2)$ 番目まで形状は生成されたものとする。

以上、砥石と工作物との幾何学的干渉の制約条件、砥石作用面への負荷の大きさや負荷の経歴、および研削作用点位置によって変化をする研削特性値を考慮にいて、トラバース研削で任意形状の工作物を作る砥石切込み制御方法を解析する。

図 6 は、理論計算のフローチャートを示す。最初に研削加工条件、研削特性値および工作物の初期寸法と仕上がり寸法を入力する。次に実砥石干渉量を求めて、砥石各ステップへの負荷に応じて各種の研削現象値を計算する。さらに、トラバース研削の基礎式 (1) から

Fig. 7 Comparison of surface profiles ground at controlled infeed (a) and at non-controlled infeed (b)

(7) をすべて満足しているか、工作物寸法が目標通りに仕上がっているかを判断する。どちらか一方でも満足していない場合には、設定砥石切込み量を計算し直して元に戻る。最後に、工作物が所定の形状に研削されたことを確認して、計算を終了する。

4.2 シミュレーション結果

図 7 は、長さ 60mm で初期形状が円筒形の工作物を、三角関数の $1/4$ で与えられる目標形状に仕上を行った場合である。図中の Δr は設定砥石切込み量、破線が目標形状で、 $R(1, L)$ は計算結果である。図 (a) は、砥石切込み制御を行った場合で、図 (b) は、単純に目標形状に一定量の切残し量を見込んで研削を行った場合である。図 (b) からわかるように、砥石と工作物とが全面接触している所はほぼ目標形状に仕上がっているが、砥石の接触開始側と終了側で、砥石と工作物の干渉幅の減少に伴って研削系のかつぎ量が小さくなるために、削り過ぎるという現象が起きて、トラバース研削特有の端だれが生じている。したがって工作物を目標形状に仕上げるためには、図 (a) のような切込み制御を行わなければならない。特に、工作物の両端に生じる端だれを防ぐためには、砥石切込み量を巧みに制御することが必要である。

図 8 は、砥石前端部の移動距離に対する砥石台切込み量および各ステップの研削背分力と寸法生成量の変化過程を示す。横軸は砥石先端の位置で示した研削距離 L をとり、砥石前端部が工作物と干渉し始める点を原点とした。砥石が工作物と干渉し始めると、研削背分力は急に大きくなる。このため砥石摩耗量 d_0 、砥石軸と工作物軸の変位量 d_1 と砥石と工作物の弾塑性変形による切残し量 d_r が増えるために、工作物を目標とする寸法まで研削するためには、さらに砥石台の切込みを増やさなければならない。この結果、砥石台移動量は図のような変化をする。砥石が工作物と干渉を終了する時には、これと全く逆の現象が起こる。第一

Fig. 8 Stock removal, normal force and infeed during traverse grinding

ステップの研削背分力と寸法生成量は他のステップと比較して非常に大きいですが、研削の進行に伴って減少する。これは、最初第一ステップの負荷が大きくて、摩耗量が増え、次第に実干渉量が減少するためである。また研削距離 L が 145 mm 付近で各ステップの寸法生成量に少し変化が現れているのは、第一ステップの摩耗形態が破壊・脱落摩耗から摩滅摩耗に遷移しているためである。ここで研削開始直後に第二ステップも寸法生成を行っているのは次の理由による。工作物の端から砥石のトラバース量に相当する幅は、第一ステップのみで目標寸法を出すことができるが、第一ステップのみで仕上げたのでは、実砥石干渉量が大き過ぎるために、仕上面粗さが悪くなる。そこで工作物表面を少なくとも 2 ステップ以上で仕上げを行うように、

Fig. 9 General paths of grinding wheel in roll grinding

砥石台切込み量を制御しているためである。

以上のように、工作物の初期形状さえ測定できれば、ここで確立した理論によって、目標の任意形状に仕上げるための砥石台切込み量を決定することができ、数値制御研削盤による任意形状生成の可能性が明らかになった。

5. 圧延ロールの再研削

圧延や製紙で用いられるロールは、一般的に円筒形ではなく樽型あるいは鼓型をしている。その上、長くても重く研削体積も比較的多いために、ロールの加工には特別なロール研削盤を用いる。砥石台切込み制御は、ロールが目標形状に仕上がるように試行錯誤して作られたカムを、砥石台切込み装置に組み込んで行っている。しかし能率やコストを考えると、数値制御によって研削を行った方が有利であると考えられる。

使用前の圧延ロールには、適切なクラウニング量が付けられている。これが使用後は、図 9 に示すように、圧延される材料が通過する中央部で摩耗が大きくなって、再研削しなければならない。再研削の時には、まず材料の通過しないカラー部を削除した後、樽型に成形加工を行う。ロールの端から端まで砥石がトラバースしながら研削を行うのでは、両端のカラー部が削り取られるまで、中央部では空研削になり時間の無駄が生じる⁶⁾。ここでは、行程 1, 2, 3, 5, 6, 7 でカラー部の除去を先に行って、行程 4, 8 で目標とする形状に仕上げる。目標形状に仕上を行う行程を行程 4 と 8 に分けたのは、工作物全体を 1 パスで仕上げた場合には、砥石の送りマークが発生しやすいので、これを防止するためである⁶⁾。

図 10 は、設定砥石切込み量と工作物形状の変化を示

Fig. 10 Surface profiles of ground workpiece and grinding wheel

Fig. 11 Real stock removal of each section on cutting surface of wheel

す。破線が砥石の切込み量を，実線が研削後の工作物形状を示す。カラー部を研削するときには，切込み量を制御していないので顕著な端だれが生じている。行程4, 8において，カラー部の切込みが大きいのは，一つ前の行程で作られた工作物形状の影響を受けるためである。また工作物両端で，砥石の侵入時に見られる砥石切込み量の急激な増減は砥石作用面の形くずれのためで，特に第一ステップと第二ステップとの砥石摩擦差によるものである。ロール研削の場合には，砥石の大きさと比べて工作物除去体積が大きいために，砥石の累積摩擦耗量が増えて，砥石作用面形状が図に示すような凸形になることは避けられないと考えられる。

図11, 12は，砥石台切込み制御行程4, 8における砥石各ステップの寸法生成量 $\Delta R(n)$ と砥石摩擦耗量 $d_0(n)$ の工作物長さ L に対する変化を示す。実線が行程4を，破線が行程8をそれぞれ表している。砥石が凸形をしているが，砥石切込み量の大きいカラー部を研削する時には第1ないし第6ステップも寸法生成にかかわっている。ロールの中央部を研削する時には，砥石中央部が作用している。したがって，各ステップの砥石摩擦耗量も寸法生成量に応じて増加している。

Fig. 12 Wheel wear in forth and eighth paths

本論文では，研削後の工作物の品質について考慮していないが，各ステップの研削現象値を把握することによって，次のようなこともわかる。例えば仕上面粗さは工作物表面を最後に仕上を行うステップの実砥石干渉量 $\Delta(n)$ と密接に関係し，また加工変質層深さは，設定砥石切込み量 ΔT が同じでも各ステップの実砥石干渉量 $\Delta(n)$ の最大値に関与する。したがって，各ステップの実砥石干渉量を制御することによって，品質も同時に制御できる可能性をこの理論は持っている。さらに一歩進めて研削砥石の形状を考えると，研削前の砥石作用面形状が真直なものより，砥石にも何らかのクラウニング量を持たせた方がよいことも予想される。

6. 結 言

いままでの，トラバース研削機構の理論的解析結果を基に，任意形状の工作物をトラバース研削によって作るための，砥石台切込み制御を解析した。その結果，トラバース研削特有の端だれを防ぐことのできる砥石切込み制御が可能になった。さらに，砥石台切込み量を数値制御することによって，任意形状の工作物がトラバース研削によって作り出せる可能性を理論的に示した。

参 考 文 献

- 1) 岡村健二郎，塚本真也，竹山一郎：トラバース研削機構の研究（第1報），精密機械，**46**，4（1980）460.
- 2) 岡村健二郎，塚本真也，竹山一郎：トラバース研削機構の研究（第2報），精密機械，**46**，4（1980）753.
- 3) 岡村健二郎，塚本真也：トラバース研削機構の研究（第3報），精密機械，**47**，12（1981）1523.
- 4) 岡村健二郎，塚本真也，坂倉守昭：プランジ研削における切込み過程の研究（第1報），精密機械，**47**，11（1981）1412.
- 5) 岡村健二郎，塚本真也，上田陽一，成川 裕：トラバース研削機構の研究（第4報），精密機械，**49**，4（1983）509.
- 6) ロール研削，東芝機械株式会社技術資料，昭和41年10月，p. 14.