

— 研削抵抗の理論式について —

東北大・工 庄司克雄, 東北大・大学院 O水野雅裕, 岩手大・工 井山俊郎, 宮城県工技セ 森由喜男

1. 結言 精密研削切断における切断面の反りの原因の一つとして、砥石断面の偏摩耗によって生じる砥石の弾性変形が挙げられる。¹⁾ そこで本報では、そのような変形の原因となる軸方向の研削抵抗も含めた、研削抵抗の3成分について考察した。

2. 研削抵抗の理論式 精密研削切断過程を図1(a)のように考える。図で、Vは砥石周速、vは工作物速度を表す。さらに、砥石軸Oを通る垂直軸(y軸)とθの傾きをなす砥石半径をOAとし、OAと砥石軸を含む断面を同図(b)のように考える。

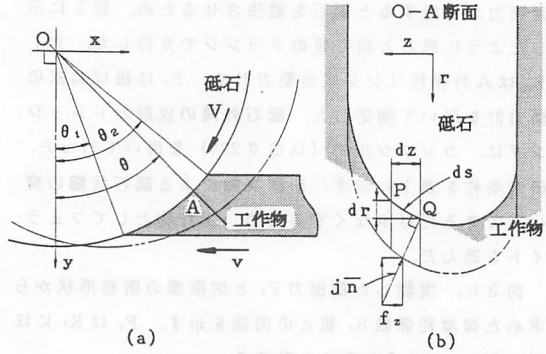


図1 砥石に作用する研削抵抗

図(b)で、長さdsの微小線素PQ上にある砥粒1個当りの平均切削断面積 \bar{S}_c について考える。 \bar{S}_c は、PQによる単位時間当りの切削断面積を、切削に関与する砥粒数jVdsで割ることによって得られ、

$$\bar{S}_c = \frac{v}{jV} \sin\theta \frac{dz}{ds} \quad (1)$$

である。ここでjは、砥石作業面の単位面積当りの有効切れ刃数である。

いま砥粒切れ刃を、砥石面に垂直な軸を持つ先端角 $2\bar{\gamma}$ の円錐形と仮定する。そして、切削時の切れ刃前縁における被削材の盛り上がり考慮した平均の砥粒切削断面積を $C \cdot \bar{S}_c$ とすれば、1個の砥粒切れ刃に働く切削分力 \bar{f} と背分力 \bar{n} は次式で与えられる。²⁾

$$\bar{f} = C \cdot p \bar{S}_c + \mu' C \cdot p \bar{S}_c \sec\bar{\gamma} \quad (2)$$

$$\bar{n} = (\pi/2) C \cdot p \bar{S}_c \tan\bar{\gamma} \quad (3)$$

ここで $C \cdot p$ は比研削抵抗であり、 μ' は砥粒と被削材との間の摩擦係数である。

微小線素PQの周りの単位面積当りに作用する研削抵抗の背分力は $j \bar{n}$ 、切削分力は $j \bar{f}$ で与えられる。したがって、そのx, y, z軸方向の分力をそれぞれ f_x, f_y, f_z とすると、次のようになる。

$$f_x = j \bar{n} (dz/ds) \sin\theta - j \bar{f} \cos\theta \quad (4)$$

$$f_y = j \bar{n} (dz/ds) \cos\theta + j \bar{f} \sin\theta \quad (5)$$

$$f_z = -j \bar{n} (dr/ds) \quad (6)$$

(2), (3)式に(1)式を代入して整理したものを、(4), (5), (6)式に代入して砥石・工作物接触面全体について積分すれば、砥石全体に作用する研削抵抗の3成分 F_x, F_y, F_z が、次のように得られる。

$$F_x = C \cdot p (Dv/16V) \{ \pi \tan\bar{\gamma} \cdot \kappa_r A_1 - 2b (1 + \mu' \sec\bar{\gamma}) A_2 \} \quad (7)$$

$$F_y = C \cdot p (Dv/16V) \{ \pi \tan\bar{\gamma} \cdot \kappa_r A_2 + 2b (1 + \mu' \sec\bar{\gamma}) A_1 \} \quad (8)$$

$$F_z = -C \cdot p (\pi v/2V) h \tan\bar{\gamma} \cdot K_r \quad (9)$$

ここでDは砥石径、bは砥石幅、hは工作物厚さであり、また A_1, A_2 および K_r, κ_r は

$$A_1 = \sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2 - 2(\theta_1 - \theta_2) \quad (10)$$

$$A_2 = \cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2$$

$$K_r = \int_{-b/2}^{b/2} \frac{dr}{ds} dz, \quad \kappa_r = \int_{-b/2}^{b/2} \frac{dz}{ds} dz$$

である。また、 θ_1 と θ_2 は、図1(a)に示すように砥石と工作物間の接触弧の範囲を表す中心角である。

さらに、(8), (9)式より次式が得られる。

$$F_y = \frac{D \kappa_r A_2 + \mu b A_1}{8h K_r} F_z + C \cdot p \frac{Dv}{8V} b A_1 \quad (11)$$

ここで μ は、 $\mu = (2/\pi) \operatorname{cosec}\bar{\gamma} \cdot \mu'$ である。(11)

式において、 F_z と F_y を変数とし、他のパラメータを定数と考えれば、 F_y は F_z の1次関数になる。したがって、 $\bar{\gamma}$ を変えることによって F_z と F_y の大きさを変化させ、それらの実測値を F_z を横軸に、 F_y を縦軸にとってプロットすれば、両者の関係は直線になる。そして、その直線の傾きから μ が求められ、縦軸を切る点の値から $C \cdot p$ の値を求めることができる。さらに砥粒切れ刃の先端角 $2\bar{\gamma}$ は、(9)式から

$$2\bar{\gamma} = -2 \tan^{-1} \left(\frac{2V}{\pi v h} \frac{F_z}{C \cdot p K_r} \right) \quad (12)$$

になり、 $C \cdot p$ および F_z/K_r の値から推定できる。

また(8), (9), (11)式より、側面力 F_z と他の2成分 F_x, F_y との関係は、砥石断面形状に関する係数 K_r ,

α_r をパラメータとして、次式のように与えられる。

$$F_z = \frac{8h}{D} \frac{K_r}{\alpha_r} \frac{F_x A_1 + F_y A_2}{A_1^2 + A_2^2} \quad (13)$$

3. 実験方法および実験結果 実験では、側面力 F_z を強調するために、砥石外周にテーパをつけて側面研削を行い、研削抵抗の3分力を測定した。その際過大な側面力が作用すると砥石を破損させるため、図2に示したように砥石と同じ径のフランジで支持した。 F_x 、 F_y は八角弾性リング式の動力計で、 F_z は板ばね式の動力計を用いて測定した。砥石外周の成形とドレッシングは、カップツルア (GC #220) を用いて行った。研削条件を表1に示す。研削実験による砥石状態の変化をできるだけ少なくするため、工作物としてフェライトを選んだ。

図3に、実測した側面力 F_z と切斷溝の断面形状から求めた偏摩耗係数 K_r 値との関係を示す。 F_z は K_r にほぼ比例し、(9)式と良く一致する。

次に図4は、 F_x と F_z に対する砥石半径切込み深さ Δ の影響を調べた結果である。(10)式から明らかなように、 Δ が大きくなると A_1 は増加し、 A_2 は減少する。したがって(7)式によれば、 F_x は増大する。一方 F_z は、(9)式から分かるように Δ に無関係であり、ほとんど変化しない。このように図4の結果は、理論式と定性的によく一致する。

次に、(11)を用いて $C \cdot p$ と μ の値を求めた。砥粒切れ刃の先端角 $2\bar{\gamma}$ は、窒化珪素を研削することによって、変化させた。その過程で、随時フェライトを表1の条件で研削し、研削抵抗を測定した。図5に、窒化珪素の累積体積除去量 (半径切込み量 $\Delta = 0.1$ mm) を横軸にとり、フェライト研削時の研削抵抗の3分力の測定結果を示す。図にはまた、 F_z / K_r と以下において求めた $C \cdot p$ の値を(12)式に代入して求めた $2\bar{\gamma}$ の計算結果も併記してある。

図6は、図5の F_y と F_z の値をそれぞれ縦、横軸にしてプロットしたものである。両者の関係は、(11)式で予測したように、ほぼ直線になった。前述したように、これより $C \cdot p = 4000$ N/mm²、 $\mu = 0.14$ が得られる。

図7は、以上の実験で求めた F_x 、 F_y 、 K_r 、 α_r および研削条件を(13)式に代入して求めた F_z の理論値と、 F_z の実測値とを比較したものである。実測値と理論値は非常に良く一致している。

参考文献

- 1) 松井, 庄司, 水野: 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1987) 911.
- 2) 松井, 庄司: 精密機械, 39-5 (1973) 535.

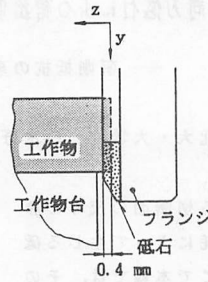


図2 実験方法

表1 研削条件

砥石	SDC140V75B6 (125×0.8×38.1)×3
砥石周速度V	1500 m/min
工作物速度v	50 mm/min
研削方向	下向き
砥石半径切込み量Δ	6 mm (8 mm, 10 mm)
研削幅b	0.4 mm
工作物	フェライト
研削液	ソリューションタイプ

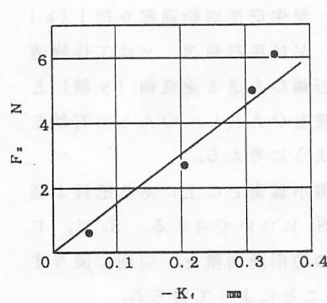


図3 F_z と K_r 値との関係

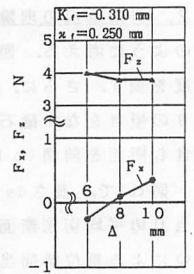


図4 F_x 、 F_z に対する Δ の影響

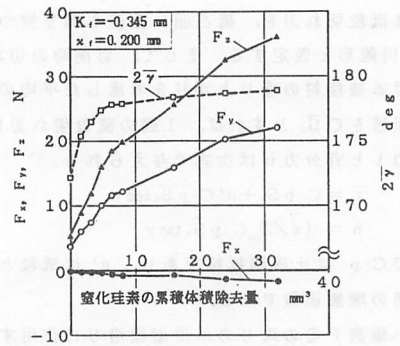


図5 研削抵抗の変化と $2\bar{\gamma}$

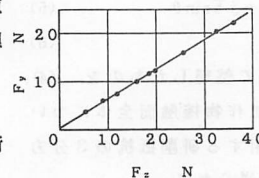


図6 F_z と F_y の関係

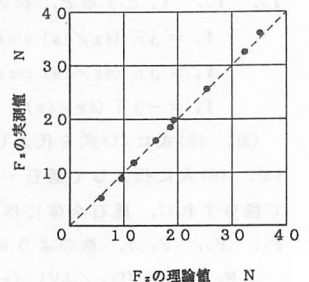


図7 F_z の理論値と実測値