# <12 回連載 ショートレクチャー> 若手技術者のための研削工学 (第5回)研削抵抗とその変化

奥山繁樹(防衛大名誉教授)

### 1. はじめに

研削中に砥石に加わる力を研削抵抗という.研削抵 抗の大小は砥石の切れ味を端的に示すもので,適正 な加工条件を選ぶため,あるいは種々のトラブルを回 避するために把握すべき重要な情報である.また研削 抵抗は,加工に必要な動力や研削熱の発生に直接関 係し,さらに砥石軸や工作物をたわませて寸法の創成 プロセスにも影響を及ぼす重要な因子である.とはいえ, モデル化が比較的容易な切削抵抗の解析でさえ簡単 ではないことから,より複雑な現象である研削抵抗を理 論的に解析・予測するには大きな困難を伴う.

そこで本稿では、研削抵抗の実験式について検討 することから始め、研削抵抗の理論および研削抵抗の 時間的変化について考察を行うことにする.なお、前回 のレクチャーで導出した式がいくつか出てくるので、こ れを参照しながら読み進めて頂きたい.

## 2. 研削抵抗

図1に,連続的な前後送りを加えながら行う「平面ト ラバース研削」における研削抵抗の3分力を示す.研 削抵抗は,砥石外周の接線方向に作用する接線研削 抵抗*F*<sub>n</sub>,砥石と工作物の接触面に垂直に作用する垂 直研削抵抗*F*<sub>n</sub>,トラバース送り方向に作用する送り研 削抵抗*F*<sub>s</sub>,の3分力で構成されている.

接線研削抵抗  $F_t(\mathbf{N})$ は, 砥石を回転させるための動 力に直結している. 主軸モータの消費動力  $P(\mathbf{W})$ は, 砥石周速度を  $V(\mathbf{m/s})$ , 主軸モータの効率を  $\eta$ とすると, 次式で与えられる.

$$P = \frac{F_t V}{n} \tag{1}$$

垂直研削抵抗 *F<sub>n</sub>*(N)は,研削盤と工作物の弾 性変位,砥石と工作物の接触変位を生じさせる.



図1 平面トラバース研削における研削抵抗 の3分力

一方,送り方向の分力 F<sub>s</sub>(N)は前二者に比べるとは るかに小さい.

# 2.1 研削抵抗の実験式

研削抵抗は、多くの研究者によって測定され、実験 式が提案されているが、そのほとんどは研削条件のベ キ指数関数の形になっている.例えば、竹中は次の実 験式を与え、指数値として**表1**を示している.

$$F_{t} = k t^{\alpha} V^{-\beta} v^{\gamma}$$

$$F_{n} = k' t^{\alpha'} V^{-\beta'} v^{\gamma'}$$

$$\left.\right\}$$

$$(2)$$

ここで, *kとk'* は比例定数, *t*は砥石の切込み深さ, *V*は 砥石周速度, *v*は工作物速度である. 表1から, 研削抵 抗に及ぼす加工条件の大まかな影響がわかる. なお, 式(2)のように「次元の一致」が見られない実験式の場 合には, 単位の設定が重要であるが, 表1に*kとk'* の 値が示されていないので, 単位の記述を省いた.

表1 研削抵抗の実験式(2)の指数値

材	質	α	α'	β	$\beta$ '	γ	γ'	比 $F_t/F_n$
焼入	れ鋼	0.84	0.84	-	Ι		_	0.49
硬	鎁	0.87	0.86	1.03	1.06	0.48	0.44	0.57
軟	鎁	0.84	0.82	0.70	0.68	0.45	0.44	0.55
鋳	鉄	0.87	0.87	—	—	0.61	0.50	0.35
黄	銅	0.87	0.77	_	—	0.60	0.50	0.45

### 2.2 研削抵抗の理論

図2に,連続的な前後送りS(m/s)を加えながら行う 平面トラバース研削での,砥粒切れ刃の切削状態を示 す.工作物表面における切れ刃の切削軌跡は切削方 向(砥石の回転方向)とある角度 $\theta$ をなすが, $S \ll V$ なの でこの角度は極めて小さく,通常無視できる.

ここで、切れ刃 1 個に働く力について考えると、図 1 と同様に接線方向の力  $f_i$  (N)、垂直方向の力  $f_n$  (N)お よび送り方向の力  $f_s$  (N)に分けることができる.  $f_s$  は極 く小さいので、以下  $f_t \geq f_n$  について 検討する.

いま, f, は切れ刃の平均切削断 面積(平均切りくず断面積)am に比 例するものと仮定し, 比例定数を 「比研削抵抗」ksと定義すると, 次式 の関係が得られる.

$$f_{\rm t} = k_s a_m \tag{3}$$

また,  $f_n \geq f_i \geq 0$ 比を $\lambda \geq \lambda \leq \lambda$ 、次式 が得られる.

 $f_n = \lambda f_t = \lambda k_s a_m \tag{4}$ 

砥石と工作物の接触面内で同時 に作用している切れ刃の数を同時 研削切れ刃数 *j* と呼ぶことにすると,

jは図2に示す砥石と工作物の接触長さ1,研削幅bおよび平均砥粒間隔のを用いて次式で与えられる.

$$j = \frac{lb}{\omega^2} \tag{5}$$

前回のレクチャーで研削加工の機何学について学 んだが,平面研削において*l*と*a*mはそれぞれ,

$$l \doteqdot \sqrt{Dt} \tag{6}$$

$$a_m = \omega^2 \, \frac{v}{V} \sqrt{\frac{t}{D}} \tag{7}$$

と書けるから、 $F_t \ge F_n$ は次式で与えられる.

$$F_{t} = j \cdot f_{t} = \frac{lb}{\omega^{2}} k_{s} a_{m} = k_{s} b t \frac{v}{V}$$

$$F_{n} = j \cdot f_{n} = \lambda k_{s} b t \frac{v}{V}$$
(8)

上式によれば,研削抵抗は研削幅 b,砥石切込み深 さtおよび工作物速度vに比例し,砥石周速度Vに反 比例するはずである.一方,図3はWA砥石で炭素工 具鋼(SK2)を研削したときのF<sub>t</sub>とF<sub>n</sub>を小野らが測定し た結果を示したもので,研削抵抗はtやvに比例してい





図2 研削中の砥粒切れ刃の切削状態 (平面トラバース研削の場合)



図3 研削抵抗に及ぼす切込み深さと工作物速度の影響

ない.この理由は、比研削抵抗k。が一定値をとらず、砥 粒の切込み深さが小さいほど大きくなる、つまり「寸法 効果」が現れるためと考えられている.

寸法効果の生じる原因については諸説あるが、砥粒 切込み深さが小さくなるほど、刃先丸みの影響を強く受 けて削りにくくなることや、摩耗した切れ刃先端の摩擦 の影響が相対的に大きくなること、などが考えられる.

図3には、研削抵抗の2分力比 $\lambda$ を示しており、その 値は切込みや工作物速度によってほとんど変化してい ない. A 系砥石で研削した場合、 $\lambda$  の値は工作物の材 質によってほぼ決まり、鋼の場合 $\lambda$ =1.8~2.5 の範囲に あって、焼入れした硬い鋼ほど大きくなる.また、鋳鉄 では  $\lambda$ =3, 超硬合金では  $\lambda$ =4 となる.

# 2.3 比研削抵抗と比研削エネルギ

式(8)から,比研削抵抗 k。は次式で与えられる.

$$k_{\rm s} = \frac{F_t}{bt} \left( \frac{V}{v} \right) \tag{9}$$

つまり, Ft を研削実験で求めておけば,式(9)によって

ksが計算できることになる.

ところで前回のレクチャーで,研削における砥石 と工作物の幾何学的作動条件に関わる無次元数 *φ*を提示した.

$$\varphi = \frac{v}{V} \sqrt{t \left(\frac{1}{D} \pm \frac{1}{d}\right)} \tag{10}$$

ここで、1/d の符号が正の場合は円筒外面研削を、 負の場合は内面研削を指す. 図 4 は、過去に発表 された研削抵抗の実験値をもとに $k_s$ を計算し、 $\varphi$ と の関係を小野がまとめた結果である.

例えば⑤に示した軟鋼における $k_s$ は、比切削抵抗(切削断面積あたりの切削主分力:1~2GPa)よりもはるかに大きく $k_s=30~100$ GPaである.また $k_s$ は $\varphi$ が小さいほど大きく、ここにも寸法効果が現れている.図のように、 $k_s$ と $\varphi$ は両対数紙上でほぼ直線関係を示すので、次の関係が得られる.

$$k_s = k_0 a_m^{-\varepsilon} \tag{11}$$

ここで、k<sub>0</sub>は比例定数(比研削抵抗定数)である.

上式と式(7)を式(8)に代入すれば, 次のような 接線研削抵抗 *F*<sub>t</sub>の一般式が得られる.

$$F_t = k_0 b \left(\frac{v}{V}\right)^{1-\varepsilon} t^{1-\frac{\varepsilon}{2}} \left(\frac{1}{D} \pm \frac{1}{d}\right)^{\frac{\varepsilon}{2}} \omega^{-2\varepsilon}$$
(12)

図4から、*ε*はほぼ0.25~0.5の範囲にあるので、仮に*ε* =0.4とおけば、次式が得られる.

$$F_{t} = k_{0} b \left(\frac{v}{V}\right)^{0.6} t^{0.8} \left(\frac{1}{D} \pm \frac{1}{d}\right)^{-0.2} \omega^{-0.8}$$
(13)

上式の v/Vとtの指数値は,表1の軟鋼での値に近いと言える.なお,式(13)は式(11)の関係を導入していることから,完全な理論式とは言えず,次元の一致も見られないことから,この式を用いる場合には,適用する単位が重要である.

k<sub>0</sub>を小野らが実験的に求めた結果を表 2 に示す.これらの値は式(13)の各変数を SI 単位にそろえた結果である.このように,砥石と工作物材料の組み合わせに応じた k<sub>0</sub>を求めておけば,研削抵抗は式(13)によって計算できることになる.

一方, M.C.Shawらは加工 条件を変化させて研削抵抗 を測定し, 比研削エネルギ e を求めている. 比研削エネ ルギとは, 工作物の単位体 積を研削除去するのに必要



実験者	砥石	工作物	変数	備考	
①Schlesinger	46 L	硬鋼	<i>V</i> , <i>t</i>		
2)Shaw	32A46H	SAE112	t		
③Coenen	C46F	鋳鉄	<i>v</i> , <i>t</i>	S=5mm	
(4)Coenen	C16F	鋳鉄	<i>v</i> , <i>t</i>	<i>S</i> =20mm	
⑤関ロー長谷川	A46H	軟鋼	<i>v</i> , <i>t</i>		
⑥佐藤	A46L	SF54	V, v, t		
⑦竹中	A46K	硬鋼	V, v, t		
⑧小野	A46M	軸受鋼	<i>v</i> , <i>t</i>	V=900m/min	
⑨小野	A46M	軸受鋼	<i>v</i> , <i>t</i>	V=1800m/min	

図4 比研削抵抗 ks と無次元数 φ との関係

なエネルギのことであり、次式で与えられる.

$$e = \frac{F_t V}{bvt} \tag{14}$$

比研削抵抗を表す式(9)と比べると、両者は完全に一 致している. つまり、両式は単位次元の解釈こそ違うも のの、全く同一のものである.

### 2.4 研削抵抗の時間的変化

一般に,研削時間とともに研削抵抗は増大する.こ れは,研削開始当初は鋭利であった砥粒切れ刃が 徐々に摩耗するためである.

図5は、鋭利な砥粒と摩耗した砥粒に作用する力の 関係を示した小野のモデルである。鋭利な砥粒切れ刃 に作用する力は、同図(a)における水平分力 f<sub>i</sub>と垂直 分力 f<sub>n</sub> であり、この力によって切れ刃は工作物に食い 込んで、切りくずを排出できる。しかし摩耗した砥粒で は、同図(b)のように、切れ刃のすくい面に働く f<sub>i</sub>'と f<sub>n</sub>'

表2 各種材料の比研削抵抗定数 k<sub>0</sub>(砥石:A60P)

	材 料	軸受鋼	1.2%C 鋼	0.6%C 鋼	1.2%C 鋼	0.6%C 鋼	0.2%C 鋼	鋳鉄	黄銅
-	熱処理	焼入れ	焼入れ	焼入れ	焼なまし	焼なまし	焼なまし	焼なまし	焼なまし
	$H\mathbf{v}$	880	630	440	275	200	110	130	130
_	$k_0 \ (\times 10^4)$	150	147	150	121	125	106	95	77





の他に, 摩耗した逃げ面でも工作物と摩擦し, その水 平分力 *f*,"と垂直分力 *f*," が新たに加わる.

逃げ面と接触している工作物表層部は降伏状態に あると考えると,工作物の降伏圧力(降伏応力の 1.8 倍 程度)を*k*<sub>n</sub>,切れ刃の逃げ面摩耗面積を *a*<sub>g</sub>とすれば, *f*<sub>n</sub>"は次式で表せる.

$$f_n = k_n a_g \tag{15}$$

このように、砥粒に作用する力は agの影響を受けることになる.切れ刃が摩耗すると、摩擦熱によって切れ刃 先端の温度がさらに高くなり、摩耗が促進されるとともに、 工作物の軟化凝着が起こりやすくなって、研削抵抗は ますます増加する.

図 6 は, 逃げ面摩耗面積率(砥石表面積に占める逃 げ面摩耗面積の割合)ηと研削幅 b あたりの研削抵抗 (F<sub>n</sub>/b, F<sub>t</sub>/b)との関係を筆者が測定した結果である.研 削初期に不安定な砥粒は脱落・破砕して研削抵抗が 減少しており,その後,定常研削状態に移行する.定 常状態においても切れ刃の状態が安定しているわけで はなく,切れ刃は次第に摩耗するから,研削抵抗は 徐々に増加する.

研削抵抗がある限度に達すると、工作物表面には研 削焼け(表面の酸化によって色調が変わる現象)が生 ずるようになる.また高温にさらされる切れ刃の逃げ面 は加速度的に摩耗して、研削を継続できなくなる.

一方,砥石の結合度が不十分な場合には,ある段階 で砥粒が急激に脱落して,目こぼれ状態になることが ある.この場合には,鈍化した砥粒切れ刃が消滅する ので,研削抵抗はいったん下がるが,再び研削時間と ともに上昇して,同様の過程を繰り返す.



図 6 逃げ面摩耗面積率 η の増加に伴う研削抵抗 F<sub>n</sub>/b, F<sub>t</sub>/b の変化

### 3. 研削抵抗の測定

研削抵抗は、研削機構解明の基礎であるばかりでなく、研削作業の良否を判定する重要な情報であるため、 ときにこれを測定あるいはモニターすることが求められる、そこで、研削抵抗の測定法について簡単に触れる.

式(1)からわかるように,接線研削抵抗 F<sub>t</sub> は研削動 力に直結しているから,主軸モータの消費電力をモニ ターすれば F<sub>t</sub> のおおまかな変化を知ることができる.し かしこれを正確に把握するには,工作物と研削盤テー ブルの間に研削動力計を設置する必要がある.

研削動力計には、抵抗線ひずみゲージを用いたも のと、圧電素子を用いたものがある.前者は手作りも可 能であるが、応答速度(固有振動数)に注意する必要 がある.後者は応答が早く、感度も良いが、高価なのが 難点である.動力計の詳細については、それぞれのカ タログをご参照頂きたい.

### 4. おわりに

研削抵抗の予測は奥の深いテーマであるが,本稿に よってその概要はご理解頂けたことと思う.なおすでに ご案内のように,このレクチャーでは参考文献の記述を 省かせて頂いているが,さらに深い学習を希望する読 者には,筆者らが著した教科書「機械加工学の基礎(コ ロナ社)」をご参照頂きたい.また本書の第1刷では,本 稿の式(13)にあたる式で  $\varepsilon = 0.25$  と仮定している.これ は,先達の例を踏襲したもので誤りではないが,図4か ら $\varepsilon = 0.4$  とするのがより妥当と考えられるので,第1刷 をお持ちの方は教科書の方をご訂正頂きたい.