621. 923. 1. 039:678. 4

ゴムの研削加工の研究*

(第2報, 研削抵抗の特性)

森 川 竜 一**

The Studies on the Rubber Grinding
(2nd Report, The Characteristics of Grinding Force)

by Ryuichi MORIKAWA

The author studied some factors affecting the tangential force at the cylindrical grinding of rubber rolls, using abrasive wheel, and introduced the characteristics equation of the grinding force, under considerations of the static mechanical relation between wheel and rubber roll, and experimental results of the 1st report on the high speed cutting with single point tool.

This equation was corrected and confirmed by means of the experiment under various conditions. The formulae of the equation ;

$$T = T_1(k_1 f + k_2)$$

$$T_1 = T_0 \left(\frac{C'}{C_0} \right)^v \left(\sqrt{\frac{rR}{r+R}} / \sqrt{\frac{r_0 R}{r_0 + R}} \right) \left(\frac{t}{t_0} \right) \left(\frac{v}{v_0} \right)^{0.7} \left(\frac{k_v' - V}{k_v' - V_0} \right) e^{k(E - E_0)}$$

where T : Total tangential grinding force. T_1 : tangential grinding force at the unit width of wheel.

1. 緒 言

ゴムをといしで研削加工するとき、数多くのと粒が工具として働いてゴムの表面を削るので、その削り機構を本質的に調べるために単粒の削り作用についての研究⁽¹⁾を前報に述べた。

その結果削り抵抗の成因も明らかにされたが、いしによる実際の研削加工における削り作用や抵抗も、この単粒の場合が集約されたものと考えることができる。現場における研削加工のできばえの中で、結果的に重要なことは仕上がり寸法精度と表面の状態であるが、研削抵抗は研削作用の適否の指針となり、機械の能力やといしの強度に関係し、また切残し量や仕上面の状態を考える場合にも関係があるので、研削抵抗が加工のできばえと能率にもっとも重要な検討事項となる。しかし常に一定の条件であらゆる工作物を研削加工することはできないので、適時に条件を変更して所要のできばえを得なければならないが、このときにあらかじめ研削抵抗の傾向を知っておれば、一部の加工条件が異なってもその場合の研削抵抗を知ることができる。上述の

目的と重要性にしたがって、本研究ではといしを用いてゴムを円筒外面研削する場合の研削抵抗について、その特性式を誘導し、さらに諸種の条件のもとに実験してその式の修正と確認とを行なった。

2. 研削抵抗の特性式の誘導

2.1 研削抵抗の考え方 研削抵抗の理論的研究は金属加工の分野において古くから研究されており、近時著しい発達を見た。すなわち古くは G. Schleginger のフライス削りの考え方に基いた瞬間切りくず面積と比切削抵抗の概念にはじまるが、近来はそれから脱却して解析的な理論⁽²⁾や帰納的な理論⁽³⁾の進歩を見た。これらの理論の多くはと粒と工作物の幾何学的な関係によって解析されたものである。すなわちと粒が工作物に切込み、その形状に等しい部分だけが削り取られるものとして、工作物の単位切削断面面積当りの降伏応力、したがって比切削抵抗の値からと粒1個当りの抵抗値を求め、これを算術的にあるいは統計的に集約して研削抵抗を算定しているので、研削の諸条件を加味したと粒の切込深さと連続切刃間隔を求めることが重要な問題であり、一方比切削抵抗も実験的にまたは材料の構造上から理論的に求められている。以上の場合には当然ながら金属の破壊機構に立脚しているので、高弾性体であるゴムの研削に適用することがで

* 昭和 37 年 4 月 3 日 第 39 期通常総会講演会において論文講演として講演, 原稿受付 昭和 36 年 11 月 29 日。

** 正員, 東洋ゴム工業会社中央研究所(茨木市下中条 202)。

きない。この基本的な削り機構について前報⁽¹⁾に調べたごとく、ゴムはと粒により引裂き傷の発生、生長、掘り起し、脱落などを繰返して削られるので、金属の場合のようにと粒に加わる力が材料の降伏応力や切削断面積によって一義的に定まらない。そこで前報の単粒高速切削の結果を適用して、ゴムの研削抵抗の特性を導くに当り次のように考える。

(i) と粒の形状は前報のバイト状単粒模型に類似し、そのすくい角も一定とする。

(ii) 1個のと粒の削り抵抗の特性は主として前報の単粒高速切削の特性に従うものと考え、削り抵抗の成因もおもにゴムとと粒との摩擦および変形損失に基くものと仮定する(単粒高速切削ではゴムのほうが高速運動をし、また1個の単粒が他の干渉を全く受けないのに対し、実際の研削では多くのと粒が近接して何度も削り作用を行ない、さらに削り温度の影響も大きいのでこの仮定は必ずしも実際のでない)。

(iii) 研削抵抗は個々のと粒の削り抵抗が集約されたものと考え、このため1個のと粒の平均削り抵抗と同時研削と粒数との積が研削抵抗となる。

(iv) といしと工作物は弾性接触をし、といしを剛体とみなす。なお接触圧力分布は研削中においても Hertz の接触理論にしたがうものとする。またゴムの研削では切残し量が非常に大きいので、接触部分の長さについてはこのことを考慮する。

以上の仮定のもとに研削抵抗の特性を導くため、まず同時研削と粒数と平均と粒切込深さを計算する。

2.2 同時研削と粒および平均と粒切込深さ

(iv) の仮定に基づき、といしと工作物の接触状態を第1図のごとく考え、切込み t の場合の切残し量を δt とし、両軸の中心を結ぶ線から接触面上の任意の点にいたる距離を x 、その点における工作物のくぼみを y とすると、接触長さ $2\bar{a}$ を次のようにして求める。

$$y_1 \doteq t - \frac{x_1^2}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)$$

第 1 図

$$y_2 \doteq \delta t - \frac{x_2^2}{2} \left\{ \frac{1}{r - (1 - \delta)t} + \frac{1}{R} \right\}$$

$$x_1 = a_1, \quad x_2 = a_2 \quad \text{において} \quad y_1 = 0, \quad y_2 = 0. \quad (1 - \delta)t/r \doteq 0$$

$$\therefore a_1 \doteq \sqrt{\frac{rR}{r+R}} \sqrt{2t}, \quad a_2 \doteq \sqrt{\frac{rR}{r+R}} \sqrt{2\delta t}$$

$$2\bar{a} \doteq a_1 + a_2 \doteq \sqrt{2} (1 + \delta^{1/2}) \sqrt{\frac{rR}{r+R}} \sqrt{t} \dots (1)$$

ここに δ は切残し率で、 $0.9 < \delta < 1$

(1) 式を変形して実際の数字を入れた値を第2図に示す。 $\delta^{1/2} \doteq 1$ と考えると図の縦軸はそのまま接触長さ $2\bar{a}$ を示すことがわかる。いま単位面積当りのと粒数、すなわちと粒分布密度を C とし、といしの単位幅当りの同時研削と粒数 j は次のごとく考えられる。

$$j = 2\bar{a}C \doteq C\sqrt{2} (1 + \delta^{1/2}) \sqrt{\frac{rR}{r+R}} \sqrt{t}$$

$$\doteq j_0 \left(\frac{C}{C_0} \right) \left(\frac{rR}{r+R} / \frac{r_0R}{r_0+R} \right)^{1/2} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1/2}$$

..... (2)

ここに j_0, r_0, t_0 はある標準条件における値を示し、といしの直径は一定であるとする。2.1 (ii) の仮定にしたがうと、前報⁽¹⁾の (17) と (26) 式の関係からと粒の押込力 F_n はと粒切込深さ g の二乗に比例するので、と粒とゴムの接触面圧力分布を $p(x)$ とすると次の関係がなり立つ。

$$g^2 \propto F_n = p(x)/C \dots (3)$$

このため平均と粒切込深さ $\bar{g}$ は接触面上の平均圧力を $\bar{p}$ とするとき

$$\bar{g}^2 \propto \bar{p}/C \dots (4)$$

となり、といしと工作物は二つの円柱の接触理論⁽⁴⁾から次のごとくなる。

$$\left\{ \frac{2(m^2 - 1)}{m^2 E} + \frac{2(m_R^2 - 1)}{m_R^2 E_R} \right\} \frac{p_0}{\bar{a}} = \frac{1}{r} + \frac{1}{R}$$

ここに p_0 : 接触面内の最大圧力, E_R : といしの弾性

第 2 図

係数 $=\infty$, m : ゴムのポアソン数 $=2$

$$\therefore p_0 = \frac{\bar{a}m^2E}{2(m^2-1)} \frac{r+R}{rR} = \frac{2}{3} \bar{a}E \frac{r+R}{rR}$$

一方 Hertz の接触理論および (1) 式とから $p(x)$ と $\bar{p}$ は次のごとくなる。

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{\bar{a}^2}}$$

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \frac{1}{2\bar{a}} - 2 \int_0^{\bar{a}} p(x) dx = \frac{\pi}{4} p_0 = \frac{\pi}{6} \bar{a}E \frac{r+R}{rR} \\ &= 0.37(1+\delta^{1/2})E \left(\frac{r+R}{rR} \right)^{1/2} t^{1/2} \end{aligned}$$

上式を (4) 式に代入して次式を得る。

$$\begin{aligned} \bar{g}^2 &\propto \frac{(1+\delta^{1/2})}{C} E \left(\frac{r+R}{rR} \right)^{1/2} t^{1/2} \\ &\doteq \frac{E}{C} \left(\frac{r+R}{rR} \right)^{1/2} t^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

すなわち平均と粒切込深さ $\bar{g}$ といし切込み t の $1/4$ 乗に比例する。ゴムを研削する場合にはその表面がといしに接触してへこむために、金属加工では全く考えられなかった 2・1 (iv) の仮定を設け、接触状態を静的に考えて上式のと粒切込深さ $\bar{g}$ を求めたが、実際には工作物もといしもともにそれぞれの周速度 v および V を有し、これらの $\bar{g}$ に対する影響を考えると、 v および V の増大は $\bar{g}$ の値をそれぞれ増加および減少させるので、その効果を加味すると (5) 式は次のごとく考えられる。

$$\bar{g}^2 \propto \frac{E}{C} \left(\frac{r+R}{rR} \right)^{1/2} t^{1/2} v^q V^{-s} \quad q, s > 0 \quad \dots\dots (6)$$

2・3 研削抵抗の特性式 研削抵抗はといしと工作物の幾何学的な相関関係と、と粒の削り抵抗の特性について考えねばならない。前者は 2・1 (iv) の仮定により前項に j と $\bar{g}$ とを求めたが、後者は 2・1 (ii) の仮定より前報の結果から、と粒の削り速度 $V+v \doteq V$ 、切込みすなわち平均と粒切込深さ $\bar{g}$ 、単粒形状、ゴムの弾性係数 E などの要素によって変化する。そこで1個のと粒の平均削り抵抗 $\bar{F}_t$ は前報の結果から

上の諸要素と次の関係にある。ただし 2・1 (i) の仮定より単粒のすくい角が一定となり、この要素の影響は考えない。

$$\bar{F}_t = \bar{F}_{t0} + \eta V, \quad \bar{F}_t \propto \bar{g}^2, \quad \bar{F}_t \propto e^{k(E-E_0)} \dots (7)$$

このために $\bar{F}_t$ の特性式は次のようになる。

$$\bar{F}_t = \bar{F}_{t0} \left(\frac{k_v + V}{k_v + V_0} \right) \left(\frac{\bar{g}}{\bar{g}_0} \right)^2 e^{k(E-E_0)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

削り抵抗の特性として $\bar{g}$ の影響を示す (8) 式は、ゴム表面が平面でしかも単粒実験で得られたものであり、(6) 式の r と C の項は適用できないで、といしの切込み t だけが単粒の押込深さと直接に関係があると思われ、(8) 式とから簡単に以下のごとく考える。

$$\left(\frac{\bar{g}}{\bar{g}_0} \right)^2 = \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{v_0} \right)^q \left(\frac{V_0}{V} \right)^s \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\bar{F}_t = \bar{F}_{t0} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{v_0} \right)^q \left(\frac{k_v + V}{k_v + V_0} \right) \left(\frac{V_0}{V} \right)^s e^{k(E-E_0)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

といしの単位幅当りの接線研削抵抗 T_1 は上式と (2) 式を用いると次のようになる。

$$\begin{aligned} T_1 = j\bar{F}_t = T_0 &\left(\frac{C}{C_0} \right) \left(\sqrt{\frac{rR}{r+R}} / \sqrt{\frac{r_0R}{r_0+R}} \right) \\ &\times \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{v_0} \right)^q \left(\frac{k_v + V}{k_v + V_0} \right) \left(\frac{V_0}{V} \right)^s e^{k(E-E_0)} \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここに

$$T_0 = j_0 \bar{F}_{t0}, \quad q, s > 0$$

(11)式はといしの単位幅について考えたが、送り f を与えたときのといしの全幅当り接線研削抵抗 (以後は単に研削抵抗、または抵抗と呼ぶ) は次の形で表わされる。

$$T = T_1(k_1 f + k_2) \quad \dots\dots\dots (12)$$

3. 研削抵抗の実験方法

3・1 実験装置 研削実験には第3図に示す Brown & Sharpe No. 13 万能工具研削盤を用い、研削抵抗はといし駆動電動機入力から求めた⁽⁵⁾。装置の可動条

第 3 図

第 4 図 電動機入力-出力線図

件は次のとおりである。

といし軸回転数 N : 1560, 2200, 2800 rpm
 工作物回転数 n : 108, 198, 364 rpm
 工作物送り f : 1.0, 1.9, 3.5, 6.5, 11.9 mm/rev

といし駆動用電動機: 1.5 kW, 220 V, 60 c,
 1740 rpm

といし寸法: No. 1 平形 外径×内径×厚さ
 = 254 ϕ mm × 38 ϕ mm × 19 mm

といし駆動用電動機の入力と出力の特性を第4図に示す。

図で W は研削時の入力 (W) で, W_0 は空転時の入力, W_G が研削による入力増加分, W_a が研削に要した動力 (W) である。といしと工作物の回転方向および接線抵抗 T kg と法線抵抗 P kg が第5図のごと

第 5 図

き関係にあるとき, 接線方向の研削抵抗と正味入力すなわち研削による入力増加分の関係を第6図に示す。

3.2 ゴムの種類と形状 試験に用いたゴムの種類とそのおもな機械的性質を第1表に示す。表中 NR は天然ゴム, (白), (黒), は白色, 黒色配合を示す。研削抵抗実験には主として NR(白) のゴムを用い, ゴムの種類の特性については全部のゴムを用いた。試験ロールの形状と寸法は第7図のものを使い, 工作物直径の影響を調べる場合には第8図のごとき円枚を重ねて大きさを任意に変更できるロールを用いた。

3.3 研削といし ゴムを研削する場合の特徴として次のことがあげられる。(i) といしの切込みと送りが大きいので切りくずが多い。(ii) 研削熱が高くなると工作物の熱膨張が著しく仕上寸法が不良となり,

第 6 図

第 1 表

		NR(白) 80	NR(白) 60	NR(白) 40	NR(黒) 30	NR(黒) 60	NR(黒) 40	SBR(黒) 80	SBR(黒) 60	SBR(黒) 40
かたさ	(JIS)	82	60	38	84	62	40	80	65	40
引張強さ	kg/cm ²	60	95	125	89	149	163	169	170	95
伸び	%	347	450	616	270	368	623	251	356	400
引裂き強さ	kg/cm	49	32	23	29	63	57	48	57	16
弾性係数 E	kg/cm ²	100	31	12.4	104	45	15	81	40	15
摩耗量	g	0.8	3.1	3.6	0.3	0.5	1.4	0.3	0.3	2.1

第 2 表

結 合 剤	と 粒	粒 度	結 合 度	組 織	気 孔	結合剤係数 B	と 粒 率 V_g	結合剤率 V_b	気 孔 率 V_p	かさ比重 V_{sp}
ビトリファイド	GC	30	G	10	多孔質	105	41	5.4	53.6	1.45
	"	"	I	"	"	135	"	6.9	52.1	1.49
	"	"	L	"	"	180	"	9.2	49.8	1.55
	"	54	G	"	"	120	"	6.2	52.8	1.47
	"	"	I	"	"	150	"	7.7	51.3	1.51
	"	"	L	"	"	95	"	10.0	49.0	1.57
レジソイド	GC	20	I	10	多孔質	125	41	12.1	46.9	1.47
	"	"	L	"	"	170	"	16.5	42.5	1.58
	"	30	G	"	"	100	"	9.7	49.3	1.44
	"	"	I	"	"	130	"	12.6	46.4	1.48
	"	"	L	"	"	175	"	17.0	42.0	1.54
	"	54	G	"	"	110	"	10.7	48.3	1.44
	"	"	I	"	"	140	"	13.6	45.4	1.49
	"	"	L	"	"	185	"	18.0	41.0	1.55

切りくずが燃えたりする。(iii) 研削量の割合に研削抵抗が小さい。

(i) と (ii) の関係からゴムの研削には気孔の大きい多孔質のといしがよく、(iii) の特徴は多孔質のといしを安心して使うことを示す。ゴムには多くの充てん剤が含まれているので、摩擦に強く自成作用の著しいと粒が好ましく、この点からと粒としてはCと粒、さらにはGCと粒がよい。結合剤には一般に用いられているビトリファイドとレジノイドとを選んだ。試験に用いたといしの仕様を第2表に示す。表中の結合剤係数とは結合剤のと粒に対する重量千分率であり、と

粒率、結合剤率、気孔率はともにといし容積に対する百分率である。といし表面の顕微鏡写真を第9図に示す。図によるとビトリファイドといしには大きい気孔が見られるが、レジノイドといしでは激しいおうとつのある樹脂結合剤とその中に散在すると粒の区別が明らかでない。これらのといし表面にある結合剤はゴムより固いので、いく分の削り作用を行なうものと考えられる。そこでといし表面の結合剤をも含めた見掛け

第 3 表

(a)		(b)	
と い し GC-	見掛けのと粒分布 密度 C' 個/mm ²	と い し GD-	見掛けのと粒分布 密度 C' 個/mm ²
30-I-V	0.7	30-G-V	0.6
54-I-V	1.6	30-I-V	0.65
		30-L-V	0.75
20-I-B	4	30-G-B	5.5
30-I-B	6	30-I-B	6.2
54-I-B	12	30-L-B	6.0

ゴム部分の直径: 70φ
鉄 心 径: 40φ

第 7 図

第 8 図

第 9 図

第 10 図

のと粒分布密度 C' 個/mm² を転写法で調べた結果が第3表(a), (b)である。(a)表は粒度の違った場合で(b)表は結合度のみの変わった場合であり, これらから見掛けのと粒分布密度はレジノイドといしのほうがピトリファイドといしより著しく多いことがわか

る。結合度の違いによると粒分布密度の相違は大きくない。

3.4 研削加工方法 研削条件の中で切込みを正しく与え, 安定した抵抗値をうるために次のような予備実験を行なった。まず所定の切込み t mm を与えて10往復のスパークアウト研削をあらかじめ行ない, さらに同じ切込み t を与えて10往復のスパークアウト研削を行なった。後の場合の研削抵抗 T kg を第10図に示すが, 1回めのゆき行程(1F)で抵抗は最大値を示し, 1回めのかえり行程(1B), 2回めのゆき行程(2F), 2B, 3F, ……と研削回数を重ねるにつれて急減し, 5B以後は漸減してほぼ一定の値に落ちつく。

第11図はまず所定の切込み t にて5往復のスパークアウト予備研削を行ない, 続いて1往復の研削回ごとに同じ切込み t を与えつつ30往復のトラバース研削を行なったときの各ゆき行程(1F)の抵抗値を示す。この場合は第1回めから数回めの研削の間に抵抗は急増し, 以後はほぼ一定の値になる。すなわちスパークアウト研削では切残し部分を逐次削って行くのに対し, トラバース研削では切込みを数回与える間に切残し量が繰越されてある限度まで蓄積して行くことを示している。

第12図には実験条件の切込み t による予備研削の後, 続いて切込み t を与えて5往復(1F, 1B, 2F, 2B, ……5B,)のスパークアウト研削を行ない, これを繰返した場合の研削抵抗を示す。図は予備研削の抵抗を除き, ゆき行程(1F, ……5F)のみの値を記してあるが, いずれの場合も最初のゆき行程(1F)の抵抗値のよく安定していることがわかる。したがって本論文ではまず実験条件と同じ切込み t mm による5往復のスパークアウト研削をあらかじめ行なった後, あら

ためて切込み t を与えて5往復(1F, ……5B)のスパークアウト研削を3度行ない, 1Fの三つの抵抗値の平均をその研削条件における研削抵抗とし, さらに5Bの値も確認した。

4. 研削抵抗と加工条件との関係

4.1 実験条件 研削加工条件として, いし切込み t mm, 工作物の送り f mm/rev, 工作物周速度 v m/min, いし周速度 V m/min を選び, それらの値は以下のごとくである。

切込み t : 0.05, 0.10, 0.20, 0.30 mm

第 11 図

第 12 図

第 13 図

工作物送り f : 1.0, 1.9, 3.5, 6.5, 11.9 mm/rev
 工作物周速度 v : 19~24, 39~44, 68~76 m/min
 という周速度 V : 1220, 1730, 2200 m/min
 ゴム材料 : NR(白)80, NR(白)40
 と い し : GC-30-I-10-V

4.2 切込みの影響 NR(白)80 と 40 のゴムについて $v=40$ m/min のとき、切込みを変えた場合の研削抵抗を第 13 図 (a), (b) に示す。これによると研削抵抗 T kg と切込み t mm との関係はほぼ原点を通る直線となり、(11), (12) 式の関係は満足している。NR(白)40 のゴムでは抵抗値が原点に集らないようであるが、これはその値が低くて装置の誤差範囲に近いたためである。5B の値も切込みが増すといく分増加する傾向にあるが、これは切残し量のごくわずかながら増えることを示している。

4.3 送りの影響 切込み t mm と工作物周速度 v m/min のある値について、送り f mm/rev と研削抵

抗 T kg との関係を示す。NR(白)80 のゴムは (a), (b) 図, NR(白)40 は (c), (d) 図でそれぞれ $t=0.10, 0.20$ mm の場合である。図によると最初のゆき行程 1F の研削抵抗 T は、送り f が増すとともに直線的に増加している。しかし T と f の関係を $f=0$ の軸に延長しても 1F の抵抗 T は零にならない。この関係は (12) 式を満足している。 $f \rightarrow 0$ で T が零にならないのは、送りをいくら細かくしても第 1 回めのゆき行程 1F では切込みに見合ったゴムを削らねばならないからである。5B の抵抗値は f が増すと増加し、 $f=0$ ではほぼ T が零に収束している。これは送りが増すと切残し量も増し、スパークアウト研削をしてしかも送りを非常に細かくすると切残し量がほとんどなくなることを示している。

4.4 切込みと送りの複合状態 研削抵抗 T は切込み t と送り f に対して前述のごとく直線的な関係にあるので、これら 1F の値を複合して工作物周速度

$v=20, 40, 70$ m/min について立体的に示したものが第 15 図 (a), (b) である。(a) 図が NR(白)80, (b) 図が NR(白)40 のゴムで、抵抗値は著しく異なるが面の形は全く相似であり、その面の性質を説明的に表わしたものが第 16 図であって、この面が (11), (12) 式の特性に一致していることがよくわかる。

4.5 工作物周速度の影響 工作物周速度 v m/min と研削抵抗 T kg との関係を示す。NR(白)80 を (a) 図に、NR(白)40 を (b) 図に表わす。この図は T, v とともに対数目盛であらわされているので、1F の T と v の直線的な関係は (11) 式を定性的によく説明している。さらに第 17 図の直線の傾斜から q の値を求めると、NR(白)の切込み $t=0.05$ mm および NR(白)40 の $t=0.20$ mm などの一部の例を除いて q の値はほぼ 0.7 に近い。したがって次の関係がなり立つものと考えられる。

$$T \propto v^q, \quad q \approx 0.7 \dots \dots \dots (13)$$

5B の場合の研削抵抗 T の値は 1F のように規則正しくないが、(13) 式の関係にあてはめて図の点から q の値を求めると、 $q \approx 1$ となり、 T は v の増加とともにほぼ直線的に増すものと考え

第 14 図

第 15 図

第 16 図

(a)

(b)

第 17 図

えてさしつかえない。(13)式で v の累乗数 q が0.7であることは、金属の研削理論で佐藤、小野⁽²⁾、渡辺⁽³⁾の求めた値と非常に類似している。

4.6 といし周速度の影響 切込み t 、送り f 、工作物周速度 v を一定にして、といし周速度 V m/minを変えた場合の研削抵抗 T kgとの関係を第18図に示す。(a)図はNR(白)80、(b)図はNR(白)40のゴムの場合で、いずれも v や f の値にかかわらず速度 V が増大すると、研削抵抗 T が直線的に減少することを示している。一方(11)式で T に対する V の係数項を選ぶと次の二つの項がある。

(a)

(b)

第 18 図

$$T \propto \left(\frac{k_v + V}{k_v + V_0} \right) \left(\frac{V_0}{V} \right)^s \quad s > 0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

すなわち前の項は単粒の高速実験⁽⁴⁾に示されたごとく、 V の増すとともに T の増大することを表わし、後の項はと粒切込深さが小さくなることから考えられるごとく、 V の増すとともに T が減少する傾向を示している。このように V が増すと研削抵抗 T を増大あるいは減少させる二つの傾向が相殺して第 18 図の結果を生じるのであって、この関係を一つの形にまとめると次のように表わすことができる。

$$T \propto \left(\frac{k_v' - V}{k_v' - V_0} \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

上式でといしの任意の周速度 V は、標準条件 V_0 の場合の比で表わしてあるために、第 18 図の直線の傾斜を示す V の係数を省略することができ、また k_v' は切込み、送り、工作物周速度、ゴムの種類などのそれぞれの特定条件において定められる定数である。なお (15) 式は第 18 図の実験結果から導かれたので、その関係の成立範囲は実験の速度範囲すなわち $V=1200 \sim 2200$ m/min の領域となる。

5. 研削抵抗と工作物直径との関係

5.1 実験条件 第 8 図の試験ロールを用いて工作物回転数 $n=364, 198, 108$ rpm のそれぞれにおける工作物周速度 $v=60$ m/min になるように、工作物直径を $d=53.0, 97.0, 176.0$ mm に仕上げ、送り $f=3.5$ mm/rev, 切込み $t=0.10, 0.20$ mm の条件で研削抵抗 T kg を測定した。

5.2 工作物直径の影響 現場においてゴムを研削するとき、同じ研削条件でも工作物直径が異なると仕上面あらさが異なり、またといし軸にかかる負荷も異なることを経験するものである。前記の実験条件における結果を第 19 図に示すが、工作物半径に関する横軸の尺度を $\sqrt{rR/(r+R)}$ に選ぶとき、 T との関係が正しく直線の上に乗ることが示され、(11) 式のなり立つことがわかる。この結果から当然ながら、といし直径が一定で他の研削条件も一定の場合に、工作物直径が増すほど研削抵抗が増大することがわかる。

第 19 図

(a)

(b)

第 20 図

6. 研削抵抗とゴムの種類との関係

6.1 実験条件 ゴムの種類を変えて研削抵抗を測定する実験条件は次のとおり。

切込み t : 0.10, 0.20 mm

工作物送り f : 3.6 mm/rev

工作物周速度 v : 40~42 m/min

といし周速度 V : 1730 m/min

といしの種類 : GC-30-I-10-V,

GC-30-I-10-B (多孔質)

ゴムの種類 : 第1表に記したすべてのゴム

6.2 ゴムの種類の影響 ゴムの種類を表わす特徴として第1表の弾性係数 E kg/cm² を選んだ。この弾性係数はゴムの応力-ひずみ曲線の原点における立ち上がりを示す値である⁽⁴⁾。研削抵抗 T kg とこの弾性係数 E kg/cm² との関係を、ビトリファイドおよびレジノイドといしの場合について図示したものがそれぞれ第20図(a), (b)である。図では研削抵抗の縦軸が対数目盛になっている。いずれの場合も T と E の関係がほぼ直線的であるので、単粒高速切削の場合と全く同じように次の関係がなり立ち(11)式の関係が適用できることを示している。

$$T = T_0 e^{k(E-E_0)} \dots\dots\dots (16)$$

上式で標準条件における研削抵抗の値 T_0 が、切込み t の大なるときに大きいことは当然であるが、弾性係数 E に固有の値ではなく、ゴムの種類によりかなり異なっている。すなわち NR(黒)と SBR(黒)とはほぼ同じ値であるが NR(白)の値が低い。この原因は、充てん剤が異なっているので第1表に示されるごとく、NR(白)のゴムは引張強さが低く、また耐摩耗性も低いとめと考えられる。といしの切込み、その他の加工条件や工作物直径が同じで、しかも弾性係数が等しく、種類の異なるゴムを削る場合には、(11)式からわかるようにと粒切込深さや工作物とと粒との相関関係が全く等しくなるので、摩耗しやすくても引張強さの弱い材料ほど削り抵抗が低くなることが考えられる。(16)式の定数 k は第20図の直線の傾斜を示すので、ゴムの種類と充てん剤の種類が同じである場合、切込みの大きさにかかわらずほぼ k の値が一定になることがわかる。

7. 研削抵抗とといしの種類との関係

7.1 実験条件 実験条件を以下に示す。

切込み t : 0.10, 0.20 mm

工作物送り f : 3.6 mm/rev

工作物周速度 v : 38~42 m/min

といし周速度 V : 1730 m/min

ゴムの種類 : NR(白)80,

NR(白)40

といしの種類 : 第2表のすべての

といし

7.2 いしの種類の影響 いし

とゴムの幾何学的な相関関係から、といしの種類の特性として粒度を選び、粒度番号に対する研削抵抗 T kg の値を、上記の実験条件のもとに示したものが第21図である。(a), (b)図は NR(白)80 のそれぞれ $t = 0.10$, 0.20 mm の場合であり、(c), (d)は NR(白)40 の値を示す。

いずれの場合も粒度番号の大きいといしほど、わずかながら1Fの研削抵抗が大きくなっている。さらにまたビトリファイドといしよりレジノイドといしのほうが、一般に抵抗値は大きくなっている。この原因は第3表に示すごとく、粒度番号が大となるほど、またビトリファイドといしよりレジノイ

第21図

ドといしのほうが見掛けのと粒分布密度が大きいからである。一方(11)式の C の関係に注目して第3表の見掛けのと粒分布密度 C' に対する研削抵抗 T kg の関係を両対数図表に示すと第22図(a), (b)を得た。(a)図はNR(白)80, (b)図はNR(白)40のゴムである。図によると T と C' の関係は対数グラフ上で直線に結ぶことができ, NR(白)80の場合はその傾斜も全く等しい。したがって次の関係が成立する。

$$T \propto (C'/C_0)^\nu \quad \nu < 1 \dots (17)$$

NR(白)のゴムでは $0.1 < \nu < 0.3$

の関係にあると考えられる。同時研削と粒数から導いた(11)式の関係は, $\nu=1$ となるべきであったが, 実際はこれよりかなり低い。この原因は次のように考えることができる。研削においてといし表面のと粒や結合剤の突起部分は非常に早い速度で走っており, 1個の鋭いと粒の先端がゴム表面の一部を引き伸ばすと, それに隣接すると粒や, 結合剤突起部分は削り作用を行わないため, 見掛けのと粒分布密度が大となるほど実際の削り作用にあずかると粒の割合が減少するので $\nu < 1$ となる。

8. 結 言

以上にといしを用いてゴムを円筒外面研削する場合の研削抵抗について, といしとゴム工作物の静的な相関関係と, 単粒の高速切削の結果から, 各種の研削条件における特性式を誘導し, さらにこれを実験によって修正し, かつその正しい形を確認した。その結果(11), (12)式および(13), (15), (16), (17)式により次の特性式を得た。

$$T = T_1(k_1 f + k_2) \left[\left(\frac{C'}{C_0} \right)^\nu \left(\sqrt{\frac{rR}{r+R}} / \sqrt{\frac{r_0 R}{r_0 + R}} \right) \times \left(\frac{t}{t_0} \right) \left(\frac{v}{v_0} \right)^{0.7} \left(\frac{k_v' - V}{k_v' - V_0} \right) e^{k(E-E_0)} \right] \quad \nu < 1 \dots (18)$$

ただし NR(白)のゴムでは $0.1 < \nu < 0.3$
ここに

T : といしの全幅にかかる接線研削抵抗 kg

第 22 図

T_1 : といしの単位幅当りの接線研削抵抗 kg/mm
 T_0 : ある標準の研削条件における, といし単位幅当りの接線研削抵抗 kg/mm

k, k_1, k_2, k_v' : 定数

f : 工作物またはといしの縦送り mm/rev

C' : 見掛けのと粒分布密度 個/mm³

t : といしの切込み mm

r : 工作物の半径 mm

R : といしの半径 mm

v : 工作物周速度 m/min

V : といし周速度 m/min,

速度範囲は 1 200~2 200 m/min

E : ゴム工作物材料の常温における応力-ひずみ曲線の原点での立ちあがりを示す弾性係数 kg/cm²

0 の添字のついたものは標準状態における値。

終りに本研究に対し懇切なる御指導をいただいた, 京都大学 佐々木外喜雄教授, 奥島啓式教授, 岡村健二郎助教授, ならびに呉製砥所の高橋鎮哉氏に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 森川, 本論文集 1113 ページ。
- (2) 佐藤, 精密機械, 17-3 (昭 26), 6; 佐藤, 精密機械, 17-6 (昭 26), 173; 小野, 機械学会論文集, 18-74 (昭 27), 15; E.R. Marshall & M.C. Shaw, Trans. ASME, 74-1 (1952), 51; W. Backer, E.R. Marshall, & M.C. Shaw, Trans. ASME, 74-1 (1952), 61.
- (3) 渡辺, 精密機械, 18-10 (昭 27), 342.
- (4) 小野, 材料力学, 第 5 版, (昭 22), 589, 丸善。
- (5) 佐々木・岡村・砂本, 第 34 期通常総会講演会前刷, 講演番号 524 (昭 32-4-3)。

討

論

〔質問〕 ゴムの研削という新しい問題について、興味ある解析と実験とを行なわれた著者の着想に敬意を表します。

研削抵抗の解析に二、三の疑問の点があるので、次の質問と意見とを申上げる。

(1) 単粒による切削抵抗を考えた論文(8)式の $\bar{g}$ はもちろん C, r に無関係であるが、これを円筒研削に適用した(11)式の $\bar{F}_t$ の中では、 $\bar{g}$ は当然 C, r (および E)に関係があるはずである。したがって、(11)式では j と $\bar{F}_t$ とから C, r の影響が消えて

$$T_1 = T_0 \left(\frac{E}{E_0} \right) \left(\frac{t}{t_0} \right) \left(\frac{v}{v_0} \right)^q \left(\frac{k_0 + V}{k_0 + V_0} \right) \times \left(\frac{V}{V_0} \right)^s e^{k(E-E_0)}$$

とするほうが合理的ではないか。 C の影響がないことは、実験結果の第21図をすなおに見れば明らかであると思う。また r の影響を実験的に認められているが、これはと粒の切削抵抗だけを考えた解析からは与えられず、といしと加工物との接触面におけるゴムと結合剤との摩擦力を考えに入れた解析が必要であると考えられる。

(2) 送り f のある場合の研削抵抗(12)式の考え方はどのようなものであるか。切残し率 δ を一定とすれば、といし幅を B として $n=B/f$ とすると、

$$T = T_1 f \left(1 + \sum_{i=1}^n \delta^n \right)$$

としてはどうか。また論文(12)式のような関係が実験的に成り立つとしても、実験結果の第14図を見れば k_1, k_2 は研削条件によって変っているから、これらと研削条件との関係を明らかにすることがたいせつであると思う。

(3) ゴムの研削では、切残し率 δ が大きい点が金

属研削と根本的に違う点であると考えられるが、これの定量的検討を行なっているか。特に研削速度 V の影響、ゴム材質 E の影響などを明らかにしておくことは、仕上面の品位ならびに加工能率の点からたいせつな点であると思う。(佐藤健児)

〔回答〕 (1) C, r に無関係な(8)式の結果は実験によって求められたものであり、これを(11)式の $\bar{F}_t$ に適用することは仮定(ii)に従っている。(8)式では円筒面の静的な接触状態を平面円板上の単粒高速切削状態に適用しているので、この場合、相互に適合しにくい項(C, r, E など)をいったん除いて考えるべきだと思う。(5)式を誘導する要点は、といしの切込み t とといし表面の平均と粒切込深さ $\bar{g}$ との関係にあり、これにより上記の円筒面接触と平面上の切削との関係を結んでいる。

と粒分布密度の影響は第22図に見られる。第21図は粒度に対する表示であり、粒度の数字がといし表面の C' と相似でないことは第3表に示されている。 C' が大きいと研削抵抗の大きくなることは現場の作業でも経験する。ただし(11)式のようにならないで(17)式のごとく訂正を要するのは高速度現象のためと考えられる。

(11)式に見られる r の影響は切削抵抗に帰因するものでなく、といしと加工物の円筒面接触の大きさから求められたもので、両者の摩擦の要素も含まれていると考えられる。

(2) (12)式は実用上の定性的な特性を示している式である。

(3) 切残し率 δ については第3報にその定性的な特性と、一部の材料の実際の値について求めており、仕上面の状態を第4報に調べている(第37期関西支部定時総会講演会、講演番号304, 305)。

外国への特許出願補助金交付先決定

特許庁では昭和37年度の優秀発明の外国特許出願補助金(総額340万円)の交付について、さる3月より7月末までの申込みのあったものから下記の7件について延16箇国に特許出願するのに94万6000円の補助交付を決めた。

前記7件の申請者、発明の種類、出願先の国、補助金額などはつぎのとおり

▽中村 忍(浜松市)、資材表面微粉体に関する発明をアメリカ、イギリス、カナダの3箇国(16万6500円)。

▽柏原 学(京都市)、変速装置に関する発明をアメリカ、西ドイツの2箇国(12万5000円)。

▽五百井 仁(習志野市)、歯車に関する発明をアメリカ、イギリス、西ドイツの3箇国(22万3500円)。

▽大中淳平(倉敷市)、写真機に関する発明をアメリカ、西ドイツの2箇国(12万4500円)。

▽日下憲三(広島県)、鶏の産卵率などを向上させる発明をアメリカ、フランスの2箇国(9万3500円)。

▽小林正二(浦和市)、射出成形機に関する発明をアメリカ、イギリスの2箇国(10万8000円)。

▽小林正二(前同)、合成樹脂成形に関する発明をアメリカ、イギリスの2箇国(10万5000円)。

(服部敏夫)