621. 923. 1. 039:678. 4

ゴムの研削加工の研究*

(第 1 報, 単粒模型工具によるゴムの削り特性)

森 川 竜 —**

The Studies on the Rubber Grinding
(1st Report, The Cutting Characteristics of Rubber
Using Single Point Cutting Tool)

by Ryuichi MORIKAWA

The present paper has made the cutting characteristics of rubber clear theoretically and experimentally, using a single point cutting tool as follows:

(1) There was a close connection between the shape of chips and the worked surface at high speed cutting, then the region of grinding phenomena became clear.

(2) The cutting force created by a single point was found to be indicated by the sum of three components, hysteresis loss, surface friction between the tool and rubber, and digging out. The characteristics of the above components were clearly known.

(3) The characteristics of scratching force and indenting force created by a spherical point and a pyramidic point were theoretically investigated and experimentally confirmed.

(4) The cutting force at high speed was obtained by experiments under various cutting conditions, and their effects on and causes for the force were found out.

1. 緒 言

といしを用いてゴムを研削する作業は広く行なわれているが, 金属の研削加工におけるごとく解析的な研究は全く見当たらない. 一方ゴムの摩擦摩耗については A. Schallmach の研究^{(1)~(5)} に詳しいが, ゴムの研削加工も計画的に大量の摩擦摩耗をうる手段と考えることができる. しかし A. Schallmach の研究は大胆な仮定を前提として進められ, 研削加工の特性を解析するに適しない. 本研究は単粒模型を用いて高速切削における切りくず生成機構と加工面の関係を調べ, また削り抵抗の成因と削り作用について考え, これに基づいて単粒模型(以下は単粒という)の押込みと引き抵抗, および高速切削抵抗の特性を実験的に求め, 研削加工の諸問題を解く手がかりとする.

2. 単粒の高速切削における切りくず生成機構と加工表面の関係

2.1 実験装置と実験方法 と粒にかわる単粒模型として第 1 図のごときバイト状のセラミック工具を

用いる. この工具の柄は動力計⁽⁶⁾に固定され, 動力計はさらに旋盤の刃物台に取付けられている. 旋盤主軸の鋼製円板上に 300 φmm×12 mm 厚のゴム板が接着加硫されている. この円板表面は所定の削り速度 ±100 m/min の幅をとって他は削りとられ, 刃物台は円板表面に沿って動くので, 所要の削り抵抗の主分力 F_t と背分力 F_n がペン書きオシログラフに記録される. 実験装置を第 2 図に示す. 切りくず生成機構を見るために, 削り条件ごとに切りくずを集め, 加工表面および削り方向に直角な断面を拡大撮影して比較検討する. 実験条件は次のごとくである. 単粒のすくい角: $\alpha = +15^\circ, 0^\circ, -15^\circ, -30^\circ, -45^\circ$, 切刃に直角な面内の逃げ角: $\gamma = 10^\circ$, 円板の回転数: $N = 2530$ rpm, 削り速度: $V = 2000, 1500, 1000, 600 \pm 100$ m/min, 切込み深さ: $t = 0.4, 0.7$ mm, 刃物台の横送り: $f =$

第 1 図

* 昭和 36 年 11 月 11 日 第 39 期全国大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 8 月 5 日.

** 正員, 東洋ゴム工業会社中央研究所(茨木市下中条 202).

0.95 mm/rev, ゴム材料: NR(白)80. 本研究に用いたゴム材料のおもな配合と機械的性質を第1表に示す. 表中の弾性係数 E は応力-ひずみ曲線の原点における傾斜で, 円柱状押込金具により求めたものである⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾.

2.2 切りくず形状の特性 各条件ごとの切りく

第 2 図

第 1 表

	NR(白)80	NR(白)60	NR(白)40
ブラウクレープ 2X	100	100	100
い お う S	12	3	3
垂 鉛 華	5	5	5
リ ト ホ ン	20	50	50
白 え ん 華	170	—	—
炭 酸 マ グ ネ シ ウ ム	—	60	—
炭 酸 カ ル シ ウ ム	—	—	10
か た さ (JIS)	82	60	38
引 張 強 さ kg/cm ²	60	95	125
伸 び %	347	450	616
引 裂 き 強 さ kg/cm	49	32	23
弾 性 係 数 E kg/cm ²	100	31	12.4

(a) NR(白)80 切込み 0.4 mm

(b) NR(白)80 切込み 0.7 mm

第 3 図 高速度単粒切削 (切りくず)

第 4 図

い角が正の値に大きいほど、削り速度が速く、切込みが深いほど生じやすい。わん曲形切りくずは連続しているが、わん曲しており、正常形の削り条件より少し α が負の方向に、削り速度がおそくなったときにあらわれる。ちぢれ形切りくずはわん曲が前者よりさらに激しく、しかも切れぎれになっているものをいう。この形の生じる条件はわん曲の正常形に対する削り条件の傾向に同じである。これが進むと粉末形切りくずとなり、さらに切りくずのない状態となる。第4図はこ

れら切りくず形状の削り条件に対する分布を示す。伸びの大きいゴムでは鋭い切刃を使っても切りくずのない場合が多く、図の切りくずなしの領域が広がる。

2.3 削り加工面の特性 上記の削り条件で削り加工表面と断面の状態を第5図(a), (a)', (b), (b)'に示す。(a)図の下段には切削前の初めの面が示されている。図により加工表面には切削形、掘り起し形、引裂き形、無傷の4種の表面状態に分類でき、その分布も第4図に示されている。切削形表面は単粒によ

NR(白)80, 切込み 0.4 mm

(a) 高速度単粒切削(切削表面)

(a)' 高速度単粒切削(切削断面)

NR(白)80, 切込み 0.7 mm

(b) 高速度単粒切削(切削表面)

(b)' 高速度単粒切削(切削断面)

てVみぞに削りとられ、みぞ内部には少しむしれがあるが掘りかえし跡がなく、正常な切削の行なわれたことを示している。掘り起し形表面はみぞ内部に深く掘りかえされた跡が並んでいる。引裂き形はみぞがほとんど見られないが、表面に引裂き傷や浅い掘り起し跡が見られる。無傷表面では切削前後が全く同じで、単粒が削り作用を行っていないことを示している。切削形と掘り起し形表面のみぞ断面積とみぞ幅およびその深さについて第6図に示したが、それらの値が削り速度の低下とともに、またすくい角 α が負になるとともに小さくなることがわかる。みぞの寸法と切込み t とを比較すると切残し量の多いことがわかる。

2.4 切りくず形状と加工面の関係 第4図によると、切削形表面の領域には正常形とわん曲形の切りくずが生じ、掘り起し形表面の領域にはちぢれ形と粉末形の切りくずが多く、引裂き形表面と無傷表面には切りくずが発生しない。この関係は正常形とわん曲形切りくずが長く連続し、ちぢれ形と粉末形切りくずが切れぎれであることから理解できる。切りくずなしの場合は引裂き形表面と無傷表面の領域であり、引裂き形表面では単粒が広義の削り作用を行なっていることになる。切りくず形状と加工表面はこのように密接な関係にあり、単粒による削り現象を第7図のように考えることができる。すなわち(a)図の削り状態が切削形表面を生じることは切りくずとみぞ寸法とから

第 6 図

容易にわかる。掘り起し形表面と引裂き形表面は(b)図のように引裂きによる掘り起し、または引裂き跡を生じる削り現象である。この場合、ゴムの大部分は単粒のすくい面と切刃の下をくぐるので、引裂き力は主として単粒とゴムとの摩擦力によると考えられる。無傷表面は単粒がゴムの上をすべるだけで削り作用は行なわれていない。一般にゴムの研削における切りくずは粉末状であり、また多くのと粒が働くので、研削加工は掘り起し形領域の一部と引裂き形領域の削り作用を行なっていることがわかる。

3. 球状単粒の削り抵抗の理論的考察

と粒による削り現象はゴムとの摩擦力によって引裂き傷を発生し、続くと粒によりその生長と掘り起しの過程を経て切りくずの出ることがわかり、摩擦力が削り抵抗の主因をなすと考えられる。しかし球状体がよく潤滑されたゴム表面をころがりすべる場合にも、ゴムの変形損失によって抵抗が発生することをD. Tabor^{(10)~(15)} などにより明らかにされている。この結果、と粒の低速における削り抵抗すなわち引かき抵抗は次のようにあらわされる。

$$\begin{aligned} \text{引かき抵抗 } (F_t) &= \text{変形損失抵抗 } (H) \\ &+ \text{表面摩擦抵抗 } (F) + \text{掘り起し抵抗 } (S) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

この掘り起し抵抗は、と粒が引裂き傷の中にはいて機械的にひっかけた場合の抵抗で、ゴムがと粒の下をくぐってすべろうとするときのつりあい状態にはいると摩擦抵抗 F に移行する。と粒が高速で走ると(1)式右辺の値がそれぞれ複雑に変化するので、削り抵抗は静的な引かき抵抗に速度効果を考慮して次のように考える。

$$\begin{aligned} \text{削り抵抗 } (F_t)v &= (H)v + (F)v + (S)v \\ &\div (H+F+S)v = (F_t)v_0 \{1 + \eta(V/V_0)^N\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに η は係数、 $(F_t)v_0$ はある基準の削り速度における削り抵抗とする。球がゴム表面をすべるときの変形損失抵抗係数 $\rho_h (=H/F_n)$ は、接触面上の平均圧力

第 7 図

を p_m とすると, ある圧力範囲では次の直線関係が成立する⁽¹⁰⁾.

$$\rho_h = c_h p_m, \quad c_h: \text{定数} \quad (3)$$

球の接触面の水平投影面積 A_n , 押込力 F_n と p_m との間には Hertz の接触理論から

$$A_n \propto F_n^{2/3}, \quad p_m = F_n/A_n \propto F_n^{1/3} \quad (4)$$

のごとくなるので変形損失による引かき抵抗 H は (3), (4) 式より次のごとくなる.

$$H = \rho_h F_n = c_h p_m F_n \propto c_h' F_n^{4/3} \quad (5)$$

表面摩擦力は真実の接触面積 A_a に比例し, また平滑な平面に対するゴムの摩擦係数が接触面圧力 p の $1/3$ 乗に逆比例すること⁽³⁾などの関係から, 球状単粒の表面摩擦による抵抗係数 ρ_f を求める. いま第 8 図の関係で球とゴムの接触圧力 p は Hertz の接触理論にしたがうものとし, その圧力の球表面への法線方向分力

$$F = \int dF = 2c_1 R \int_0^{\varphi_0} p^{2/3} r \cdot 2 \int_0^{\pi/2} \left\{ 1 - \varphi^2 \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} \cos^2 \theta \right) \right\} d\theta d\varphi = 2\pi c_1 \int_0^a p^{2/3} r \left(1 - \frac{7}{12} \frac{r^2}{R^2} \right) dr$$

ただし $\varphi \doteq \sin \varphi = r/R$, $d\varphi = dr/R$, $\varphi_0 = a/R$ であり, 一方接触面内の圧力分布は

$$p = \frac{3}{2} \frac{F_n}{\pi a^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}$$

$$\therefore F = 2\pi c_1 c_2 \left[\int_0^a r \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/3} dr - \frac{7}{12R^2} \int_0^a r^3 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/3} dr \right] = 1.44c_1 (F_n a)^{2/3} \left[1 - \frac{a^2}{4R^2} \right]$$

$$\therefore \rho_f = \frac{F}{F_n} = 1.44c_1 \left(\frac{a^2}{F_n} \right)^{1/3} \left[1 - \frac{a^2}{4R^2} \right] = 0.985c_1 p_m^{-1/3} \left[1 - \frac{a^2}{4R^2} \right] \quad (6)$$

すなわち表面摩擦力による球状単粒の抵抗係数 ρ_f の p_m に対する関係は, 押込量の少ない範囲で, 表面摩擦係数 μ の p_n に対すると同様に p_m の $1/3$ 乗に逆比例する. そこで (4) 式の関係より

$$F = \rho_f F_n \doteq c_f p_m^{-1/3} F_n = c_f' F_n^{8/9} \quad (7)$$

一方掘り起しのない場合の引かき抵抗 F_t の関係は

$$F_t = \rho F_n = F + H = \rho_f F_n + \rho_h F_n = (\rho_f + \rho_h) F_n \quad (8)$$

掘り起しによる引かき抵抗 S を求めることは困難であるが, 機械的にゴムをひっかけて切削または引裂きが行なわれることを考えると, 比切削抵抗 σ_c , 切削断面積 A_c と引裂き強さ T_r とから第 7 図の関係より次のごとく与えられる.

第 8 図

p_n と表面摩擦係数 μ との積 μp_n が摩擦力として球状単粒の進行と反対方向に働くものとする. そこで図の φ の頂角をもつ球帯について考えると, 球帯の微小表面積 $dA = rRd\theta d\varphi$ と $\mu = c_1 p_n^{-1/3}$, $p_n = p \cos \varphi$ の関係から摩擦力 dF は

$$dF = \mu p_n \cos \varphi' dA = c_1 p^{2/3} \cos^{2/3} \varphi \cos \varphi' dA$$

しかるに

$$\tan \varphi' = r \cos \theta / R \cos \varphi = \tan \varphi \cos \theta$$

$$\therefore \varphi' \doteq \varphi \cos \varphi \quad (\varphi, \varphi' \text{ が小さいとき})$$

$$\cos^{2/3} \varphi \cos \varphi' \doteq 1 - \varphi^2 \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} \cos^2 \theta \right),$$

$$\therefore dF = c_1 p^{2/3} \left\{ 1 - \varphi^2 \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} \cos^2 \theta \right) \right\} r R d\theta d\varphi$$

上式を接触面全体にわたって積分したものが表面摩擦抵抗 F となるゆえに

第 9 図

$$S = \sigma_c A_c = T_r l_t \dots\dots\dots (9)$$

4. 単粒の削り作用の理論的考察

非常に鈍い先端の単粒をゴムに押込んで走らせた場合にもゴム表面に引裂き傷が発生して、削り作用の主因をなしていることは第5図のすくい角 α の負の側に大きい領域の現象からわかったが、これは球状単粒の場合でも見られる⁽⁴⁾。球状単粒で引裂き傷を生じる現象について二次元的な光弾性実験の研究⁽⁴⁾⁽¹⁶⁾があるが、その理論的な関係が明らかでないので次のようにして求める。単粒とゴム表面との関係を二次元的に考え、第9図(a)のごとき半径 R の円筒がゴムの弾性半平面に F_n の力で押込まれ、図の進行方向に引かれたとする。接触面上の圧力分布 $p(x)$ は(b)図のように放物線状であると、表面摩擦による接触面上のせん断力 $S(x)$ は(c)図のごとく一定の摩擦係数 μ と $p(x)$ の積であると考え、さらにゴムの変形はフックの法則にしたがうものと仮定する。弾性半平面上に放物線状のせん断力分布のある場合の応力関数 ϕ は次の形で表わされる⁽¹⁷⁾。

$$\phi = \frac{\mu p_0}{\pi} \left\{ \frac{y^2}{6a^2} (3a^2 - 3x^2 + y^2) \log \frac{r_2^2}{r_1^2} + \frac{2}{3} ay\omega + \frac{xy}{3a^2} (x^2 - 3y^2 - 3a^2)\phi + \frac{4xy^2}{3a} \right\}$$

ここに

$$r_1^2 = (x-a)^2 + y^2, \quad r_2^2 = (x+a)^2 + y^2, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{2ay}{x^2 + y^2 - a^2}, \quad \omega = \tan^{-1} \frac{2xy}{x^2 - y^2 - a^2}$$

ゴムの表面の引裂き力は単粒の進行方向の応力 σ_x について考えればよいから

$$\begin{aligned} \sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = & \frac{\mu p_0}{\pi} \left[\frac{1}{a^2} (a^2 - x^2 + 2y^2) \log \frac{r_2^2}{r_1^2} + \frac{y^2}{a^2} (5a^2 - 5x + 3y^2) \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right) \right. \\ & - \frac{2y^4}{3a^2} \left(\frac{1}{r_2^4} - \frac{1}{r_1^4} \right) (3a^2 - 3x^2 + y^2) + \frac{8ax}{3} \left[\frac{x^2 + y^2 - a^2}{\{(x^2 - y^2 - a^2)^2 + 4x^2 y^2\}} + \frac{y^2 \{(x^2 - 2a^2)^2 - (y^2 - a^2)^2\}}{\{(x^2 - y^2 - a^2)^2 + 4x^2 y^2\}^2} \right] \\ & + \frac{x}{3a^2} \left[-18y\phi + \frac{4a(x^2 - 9y^2 - 3a^2)(x^2 - y^2 - a^2)}{\{(x^2 - y^2 - a^2)^2 + 4x^2 y^2\}} \right. \\ & \left. \left. - \frac{4ay^2(x^2 - 3y^2 - 3a^2)\{(x^2 - y^2 - a^2)(3x^2 + y^2 + a^2) + 4x^2 y^2\}}{\{(x^2 - y^2 - a^2)^2 + 4x^2 y^2\}^2} \right] + \frac{8x}{3a} \right] \end{aligned}$$

ゴムの表面は $y=0$ のところであり、さらに極大極小を求めるために微分すると次の式が得られる。

$$(\sigma_x)_{y=0} = \frac{\mu p_0}{\pi} \left[\frac{1}{a^2} (a^2 - x^2) \log \left(\frac{x+a}{x-a} \right) + \frac{4x}{a} \right] \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{d(\sigma_x)_{y=0}}{dx} = \frac{\mu p_0}{\pi} \left[-\frac{2x}{a^2} \log \left(\frac{x+a}{x-a} \right) + \frac{8}{a} \right] \dots\dots\dots (11)$$

(10)式を x に対して変化する項のみの形に整理し、図示すると第10図のごとくなる。図によると単粒の接触中心の後側(x の正の側)に引張応力が作用し、接触半径 a の0.82倍のところで最大応力の働くことがわかる。この最大応力の値は次のごとくなる。

$$(\sigma_x)_{x=0.82a} = \pm 4.85 \mu p_0 / \pi = \pm 1.54 \mu p_0 = \pm 2.32 \mu \bar{p}_m \dots\dots\dots (12)$$

実際にゴムは単粒との接触面の後部で引裂き破壊を生じるので、(10)式から導かれた第10図は実際の現象をよく説明している。この式の誘導にはゴムがフックの法則にしたがうという大胆な仮定を用いたので、(12)式の定量的な関係をそのまま使えないが、かたいゴムには適用しうると考えられる。

5. 球状単粒の押込みと引き抵抗の実験的考察

単粒の引き抵抗は(1)式で表わされるが研削加工でゴムはといしと接触してへこむために、と粒の切込深さは非常に浅いと考えられるから、抵抗には主として変形損失と表面摩擦の要素を考えればよい。さらに

第10図

抵抗の実験的解析を厳密に行なうには球状単粒が適しており、その押込深さと接触面積の関係、接触面積と押込抵抗、押込抵抗と引き抵抗の関係を逐一求めることができ、これを第1図のバイト状単粒模型の場合にも応用することができる。

5.1 実験装置と実験方法 実験装置は第2図に同じであるが、押込力に対して高感度の動力計を用い、押込深さを正確にダイヤルゲージでとらえた。この関係を第11図に示す。実験条件は鋼球の直径： $d=7.14, 3.18$ mm, 引き速度： $V=2\sim3$ m/min, 押込深さ： $t=0.4\sim2.0$ mm, ゴム材料：NR(白)80, NR(白)60, NR(白)40。鋼球はホルダに接着されており、実際の接触半径を知るには鋼球表面に紅がらをぬり、それを押込んだ後にはげた部分の直径を顕微鏡で測定した。変形損失の引き抵抗 H は潤滑剤とし

第 11 図

第 12 図

第 13 図 7.14φmm ボールの押込量と接触面直径

てワセリンをゴム表面に塗布した場合の値をとり、表面摩擦による抵抗 F は無潤滑表面の引き抵抗 F_t と (8) 式の関係から求めた。

5.2 球状単粒の押込み 球とゴムとの接触状態は第12図のごとくで、Hertzの理論から接触面の直径の理論値を $(da)_{th}$ とすると次の関係がよく知られている。

$$(da)_{th} \div 2\sqrt{2Rt_1 - t_1^2} \div 2\sqrt{Rt - 0.25t^2} \dots\dots (13)$$

これを直径 7.14 mm の球状単粒により確かめたものが第13図で、接触面直径が材料の弾性係数には無関係であり、また実際の値が理論値より約1.1倍大きいこともわかる。球状単粒の押込抵抗 F_n と接触面の水平投影面積 A_n との間には直径 3.18 mm の球の条件を入れるとポアソン比 $\nu=0.5$ として次の関係がある。

$$F_n = \frac{4}{3} \frac{E}{1-\nu^2} \frac{a^3}{R} = 0.202EA_n^{3/2} \dots\dots (14)$$

この関係の実験結果を第14図に示すが、図中の鎖線は (14) 式の E に第1表の値を代入したものである。この実験結果に実際の面積増加率 $1.22(\div 1.1^2)$ を乗

第 14 図

第 15 図

じて実線を右に移すとほぼ鎖線と重なるので (13), (14) 式の関係が, 接触面積増加分を考慮すればかなりの精度で成立することがわかる。

5.3 球状単粒の引かき 潤滑表面における引かき抵抗から ρ_h を求め, 第 14 図より計算した p_m との関係を示す第 15 図に示すが, この圧力範囲ではほぼ (3) 式を適用することができる。一方表面摩擦による抵抗 F から抵抗係数 ρ_f と p_m の関係を示したものが第 16 図である。すなわち

$$\rho_f = c_f p_m^{-N} \quad \left. \begin{array}{l} \text{NR(白)60; } N=1/2.8, \\ \text{NR(白)40; } N=1/2.5 \end{array} \right\} \dots\dots (15)$$

これは (6), (7) 式の関係がほぼ成立することを示している。また変形損失 H と表面摩擦による抵抗 F とを F_n に対して図示すると NR(白)60 のゴムでは第 17 図のようになり, 次の関係から (5), (7) 式によく一致する。

$$H \propto F_n^{1.4} = F_n^{4.2/3}, \quad F \propto F_n^{0.843} = F_n^{7.6/9}$$

6. 単粒の押込みと引かき抵抗の実験的考察

高速切削に用いたバイト状単粒模型は広範囲の削り現象を示し, またその切刃はと粒のへき開面のりょう

第 16 図

第 17 図

として考えられるので, 実際の削り作用に適した形状であると思われる。しかし, この単粒による引かき抵抗の解析は困難であるので, 球状単粒と比較して帰納的に求める。

6.1 実験装置と実験方法 単粒模型は高速切削と同じで実験条件は球状単粒の場合と同じである。

6.2 単粒の押込み 単粒をゴムに押込んだ部分の図を第 18 図に示す。ゴムの表面下に埋った見掛けの接触面の水平投影面積 A_n' と押込深さ t との間には次の関係がある。

$$A_n' = b \ln = A_c (\tan \alpha + 1/\tan \gamma_n) \\ = 0.249 t^2 (4.01 + \tan \alpha)^2 \dots\dots (16)$$

押込抵抗 F_n と t との関係を示す第 19 図に示すが, (16) 式とから次のことがわかる。

$$F_n \propto t^2, \quad F_n \propto A_n', \quad p_m' = F_n/A_n' = k(\alpha) \dots (17)$$

第 3 式は見掛けの平均接触圧力 p_m' が単粒の形状により一定の値になることを示している。球状単粒では (14) 式に示されたごとく F_n は A_n の 3/2 乗に比例したが, バイト状単粒は両者が直線の関係になる。

第 18 図

第 19 図

6.3 単粒の引き 単粒の引き抵抗も変形損失抵抗 H と表面摩擦抵抗 F とに分けて求める。NR(白)60 と 40 のやわらかいゴムで、しかもすくい角 $\alpha = -15^\circ \sim -60^\circ$ の場合でゴム表面に傷をつけない状態について求めた ρ_h と p_m' の結果は第 20 図のごとくであり、球状単粒のようにゴムの種類に固有の直線関係が成立しないが、単粒形状が同じものの間には一定の関係がみとめられる。いま単粒がゴムを引かくときの状態を二次元的に考え、第 21 図のごとく表面摩擦が存在しないと圧力 p が面に垂直に加わるものとし、鉛直方向の分力 $p \sin \alpha$ の大きさが、ゴムの表面からの深さに比例するものと考え、 $ds_1 \sin \alpha = dr_1$ の関係から次の式が導かれる。

$$F_t = \int p \cos \alpha ds_1 = \cot \alpha \int_0^{b_1} p dr \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$F_n = \int p \sin \alpha ds_1 + \int p \sin \gamma_n' ds_2 \\ = \left(1 + \frac{b_2}{b_1}\right) \int_0^{b_1} p dr$$

F_t の抵抗に打勝って単位長さだけ単粒を動かすときに失われる変形損失による仕事は BF_t となるので、変形損失抵抗係数 ρ_h は次のごとくなる。

$$\rho_h = \frac{BF_t}{F_n} = B \cot \alpha / \left(1 + \frac{b_2}{b_1}\right) = \frac{B}{\tan \alpha + \tan \gamma_n'} \quad \dots\dots\dots (19)$$

第 20 図

第 21 図

第 22 図の実験結果は上式の正しいことを示している。すなわち ρ_h はゴムの種類と単粒の押込深さが同じとき、単粒形状すなわちすくい角 α と関数関係にあり、球状単粒の場合と異なる。表面摩擦の項について ρ_f と p_m' の関係を求めたものが第 23 図であるが、ゴムの種類ごとにまとまり、 α が異なっても同じ傾向に集約されることを示している。この実験結果から次の関係が得られた。

$$\rho_f \propto p_m'^{-N} \quad \text{NR(白)60 ; } N=0.95, \quad \left. \begin{array}{l} \text{NR(白)40 ; } N=1.27 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

この関係は球状単粒の場合と類似であるが、 N の値が $0.3 \sim 0.4$ であったのに比し、ここではほぼ 1 に近い。 H と F の値は (18), (19), (20) 式から次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} H = \rho_h F_n \propto f(\alpha) F_n \propto \cot \alpha F_n \\ F = \rho_f F_n \propto p_m'^{-N} F_n \propto k' F_n^M \end{array} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

上の第 2 式は (17) 式から導くと $F \propto k(\alpha)^{-N}$ となるが、球状単粒と異なって単粒が進行する前側と後側で接触面の状態が異なり、さらに表面摩擦のある場合の引きでは第 23 図のように α の値には無関係となるから累乗数 M を用いてまとめた。 H と F の F_n に

第 22 図

第 23 図

(a)

(b)

第 24 図

(a)

(a)'

(b)

(b)'

(c)

第 25 図

に対する関係を第 24 図 (a), (b) に示すが, 鎖線で結ばれた H の傾向は (21) の第 1 式を説明している. F は単粒形状に関係なく, 累乗数 M の値を求めると, $M=1.3$ (NR 白 60) と 1.2 (NR 白 40) となるからほぼ次の関係が得られる.

$$F \propto k' F_n^{5/4} \dots \dots \dots (21)'$$

7. 単粒の高速切削抵抗の実験的考察

7.1 実験装置と実験方法 実験装置と削り抵抗の測定方法は高速切削の項に述べたとおりである. 実験条件の中で追加されたものは, $\alpha = -60^\circ$, $t = 1.0$ mm, ゴム材料が NR(白)60, NR(白)40 である. 削り速度 $V=0$ のときの抵抗は引き抵抗の値を用いた.

7.2 削り速度の影響 抵抗の主分力 F_t , 背分力 F_n と抵抗係数 ρ などと, 削り速度 V との関係を第 25 図 (a), (a)', (b), (b'), (c) に示す. NR (白) 40 では F_n の値が動力計の感度以下なので ρ を求められなかった. この図から F_t , F_n と V との関係は

第 26 図

第 27 図

少数の例外を除いてはほぼ直線的に V の増加とともに F_t , F_n も増すと見ることができる. したがって (2) 式の $N=1$ で次のごとくなる.

$$(F_t)_V = (F_t)_{V_0} \{1 + \eta(V/V_0)\} \dots \dots \dots (22)$$

速度に対する抵抗の増加率 η の値は図からわかるようにゴムがかたいほど大きくなり, 同じゴムでは α が負の方向に大となるほど小さくなる傾向を有している. この原因はかたいゴムの場合に削り速度が増すほど切削断面積が大きくなり, 一方 α が負の方向に大となるとゴムの変形速度が小さくなるためである. ρ と V の関係は $V=0$ のときと $V > 600$ m/min の場合とが不連続になっているが, 後者の範囲ではだいたい次の関係が成り立つ.

$$(\rho)_V = (\rho)_{V=600} \{1 + \eta'(V/600)\} \dots \dots \dots (23)$$

NR(白)80 で単粒が切削作用を行なったときの主分力 F_t を, ゴム表面下にある部分の切削断面積 A_c および実際の削りみぞの断面積 A_{ac} で割った値をそれぞれ σ_c および σ_{ac} とすると, これらの値と削り速度との関係を第 26 図に示す. σ_{ac} の物理的な意味は次式の関係から単位切削量当りの切削仕事すなわち比切削エネルギーを表す.

$$\sigma_{ac} = F_t/A_{ac} = F_t V/A_{ac} V \text{ kg mm/mm}^3 \dots \dots (24)$$

第 26 図によると σ_c , σ_{ac} はそれぞれ削り速度 V と比較的簡単な次の関係にあることがわかる.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= k_c V^{0.141} \\ \sigma_{ac} &= k_{ac} V^{-0.555} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (25)$$

k_c , k_{ac} は α の値により定まる定数である.

7.3 切込みの影響 削り抵抗 F_t , F_n と切込み t との関係を第 27 図 (a), (b) に示す. 単粒の切削断面積 A_c が t^2 に比例するために t 軸を t^2 の間

隔に目盛った結果, 次の関係にあることがわかる.

$$\left. \begin{aligned} F_t &= k_1' + k_1 t^2, \\ F_n &= k_2' + k_2 t^2, \quad k_1', k_2' \neq 0 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (26)$$

すなわち抵抗 F_t , F_n と t^2 との間は直線関係にあって, しかもほぼ原点を通るとしてさしつかえない. 係数 k_1 , k_2 の値は α が負の方向に大となるほど小さくなっている. これもゴムの変形速度が α によってかわるためと考えられる. (21) 式の累乗数 M が 1 に近いと考えると (17) 式より (26) 式の関係が導かれる.

7.4 単粒形状の影響 削り抵抗と単粒のすくい角 α との関係を第28図(a), (b)に, 抵抗係数 ρ と α の関係を(c)図に示す。(a)図はNR(白)80の場合で, F_t の値が $\alpha = -15^\circ$ で最大値を示している。 α が -15° より正に向かった範囲では単粒がゴムを切削しているので一般の切削加工の場合のごとく, すくい角が小さくなるほど削りにくくなり, F_t, F_n が増加する。 α が -15° を越えて負の方向に増加すると, もはや切削は行なわれないうで引裂き傷を生じたり表面を摩擦するだけとなる。表面摩擦力は単粒形状の影響の少ないことを先に調べたが, 機械的なひっかかりによる掘り起し抵抗と変形損失抵抗もともに減少する傾向があることも前節に明らかにされた。一方切込み t が等しくても α が負の方向に大となるほど接触面積が大となって F_n が増加することは第19図に示したとおりであるが, 第21図の関係よりゴムの変形速

度が小さくなるために F_n が減少する。この二つの相反する原因が相殺し合って第28図のような増加あるいは横ばいの傾向を示す。一般にかたいゴムほど接触面積の増加に伴う F_n の増大の影響が大きいがわかる。NR(白)60の場合は(b)図のごとく F_t の最大値に当る α の位置がNR(白)80の(a)図より左にずれている。これは切削形領域がずっと α の正に大きい部分に移っているからである。(c)図の ρ はいずれの場合も α が負に向かうほど著しい減少を示すが, これは F_t, F_n の α に対する傾向から当然のことである。

7.5 ゴムの弾性係数 E との関係 切込みが一定で3種類のゴムにつき主分力 F_t , 抵抗係数 ρ と弾性係数 E との関係を示したものが第29図(a), (b)である。主分力の軸を対数目盛にすると, F_t と E は直線的な関係となり次式の成立することがわかる。

第 28 図

第 29 図

$$F_t = F_{t_0} \exp \{k(E - E_0)\} \dots\dots\dots (27)$$

ここに F_{t_0} と E_0 は、ある標準状態における削り抵抗の主分力とその材料の弾性係数である。削り抵抗の大きさをゴムの種類から推定するには、JIS かたさによるよりは円柱状押し金具を用いて、材料の弾性係数 E を測定することのほうが合理的である⁽⁹⁾。このことは削り抵抗がゴム材料の応力-ひずみ曲線の初めの立上がりの大きさに大きく左右されることを物語っている。抵抗係数 ρ の値は α が 0° に近い場合に、ゴムがかたくなるほど大きくなり、 α が負のほうに大きな場合には減少することがわかる。

8. 結 言

単粒模型工具によるゴムの削り特性について理論的実験的に考察した結果次のことがわかった。

(i) 高速切削における切りくず形状と削り加工面の状態との間には密接な関係があり、研削加工では掘り起し形領域と引裂き形領域の削り作用を行なっている。

(ii) 単粒の削り抵抗はゴムの変形損失と表面摩擦および掘り起しによる抵抗の和であることを述べ、引きき作用における関係式を求めた。また削り作用については二次元の状態では理論的に削り現象の説明を行なった。

(iii) 球状単粒の押込みと引きき抵抗を実験により求めて理論の正しいことを確かめ、これを基礎としてバイト状単粒模型の押込みと引きき抵抗の特性を明らかにした。

(iv) 高速切削において削り抵抗が削り速度や切込深さ、単粒形状、ゴムの弾性係数などによる影響を実験的に調べ、その傾向の原因を明らかにした。

以上の結果によってゴムのと粒加工における基本的な諸特性が明らかになり、研削加工の研究に対する基礎資料が得られた。

本研究に対して終始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、岡村健二郎助教授に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) A. Schallamach, *J. Polymer Science*, **9-5**(1952), 385.
- (2) A. Schallamach, *Trans. Inst. Rubber Ind.*, **32**(1956), 142.
- (3) A. Schallamach, *Proc. Phys. Soc. Lond.*, **65-9**(1952), 657.
- (4) A. Schallamach, *Proc. Phys. Soc. Lond.*, **B-67**(1954), 883.
- (5) A. Schallamach, *Wear*, **1** (1957/58), 384.
- (6) 奥島, 機械学会論文集, **21-110** (昭 30), 709.
- (7) S. Timoshenko & J. N. Goodier, *Theory of Elasticity*, (1951), 371, McGraw-Hill.
- (8) Н.И. Бэзэр-хоф, 佐藤訳, 弾性塑性論, (昭 31), 215, 日刊工業新聞社.
- (9) 関口, 第4回材料試験協会連合講演会前刷 (昭 35-9).
- (10) J. A. Greenwood & D. Tabor, *Proc. Phys. Soc. Lond.*, **71** (1958), 989.
- (11) D. Tabor, *Brit. J. Appl. Phys.*, **6-3** (1955), 79.
- (12) D. Tabor, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **Sec. A-229**(1955), 198.
- (13) D. Tabor, *Rubber Chem. Techn.*, (1960), 142.
- (14) B. E. Sabey, *Proc. Phys. Soc. Lond.*, **71** (1958), 979.
- (15) A. M. Bueche & D. G. Flom, *Wear*, **2-3** (1958), 168.
- (16) ガーリン, 佐藤訳, 弾性接触論, (昭 33), 62, 日刊工業新聞社.
- (17) 文献 (7), 129 ページ.

討 論

〔質問〕 (1) 切削形と掘り起し形の差異をもっと詳しく説明してほしい。

(2) 1116ページ右欄8行めおよび結論に、ゴムの研削では切りくずが粉末状であるため、掘り起し形または引裂き形領域で切削が行なわれているとあるが、切りくずの顕微鏡観察によって確認したものか。またと粒の切刃が鋭利なときには切削形切りくずの生成も考えられるが。

(津 和 秀 夫)

〔回答〕 (1) 両者の現象的な差異は2・3に述べたごとく、削りみぞおよび切りくずが切削形表面の場合は長く連続し、掘り起し形表面の場合はきれぎれになっている。この原因を考えると切削形では第7図(a)に示されるように、あたかもバイト切削におけるごとくゴムは単粒切刃で切削され、切りくずは単粒のすくい面上を連続してすべっていく。これに対して掘り起し形の場合ははじめに少し切削が行なわれ、あ

るところまで達すると(b)図のように単粒先端直後のゴム表面に引裂き傷が発生し、その後この引裂き傷が生長して行き、ゴムは切刃で切削されない。この間単粒は進行を続けるが、引裂き傷の長さ l_t が十分に大きくなると単粒のすくい面とゴム表面はすべりはじめ、ゴムはもはや引裂かれないで単粒の下をくぐって

付 図 1

行き、単粒が通過し終わった後には掘り起し跡が残る。したがって切削形とはゴム表面に引裂き傷の発生、生長および単粒表面とのすべりなどの過程が全く存在しない場合であり、掘り起し形でははじめに部分的な切削が行なわれた後に上記の過程をたどる。さらに引裂き形表面の場合は切削が全く行なわれないで引裂き傷の発生、生長、すべりの過程のみをたどる。掘り起し形表面は切削形と引裂き形の間時的なものであるが、この状態を詳しく示すと付図1のごとくなる。過程は(a), (b), (c), (d)の順に進行するが、①, ②が引裂き傷であり、①', ②'の一部が切りくずとなって脱落する。

(2) ゴムをといしで研削したときの切りくずが粉末状であるのは顕微鏡観察によって確認したものである。切りくずは粉が集ってもぐさのようになっており、針先で突くといくらでも小さな細粉に分かれる(付図2)。

研削の場合はゴム表面の一部をいくつもの粒が掘り進むので、ある一つの粒が作った引裂き傷を次の粒が大きく生長させる。これらを繰返して粉末状切りくずを発生させる。この過程を付図3に示すが、傷はA, B, C, Dの順に生長し、最後にEの部分で粉末になって落ちると考えられる。ドレッシングをした直後のといしでかたいゴムを削るとき、ごく浅い削りみぞを生じることがある。しかし、この場合もごくわ

0.1mm

付 図 2

付 図 3

ずかのちぢれ形切りくずを生じるのみで、一般に粉末状切りくずのみであると断定できる。

キャビテーションおよび水力機械国際会議

このほど仙台の東北電力ビルにおいて標記の国際会議が開かれた。

この国際会議はわが国で初めて開かれたもので、キャビテーション(初生機構、実験技術、寸度効果、翼形性能、壊しよくその他)および水力機械(水車、ポンプ、ポンプタービン、水力継手、船舶推進器、水圧機、その他水力機械一般)に関する理論、実験的研究を国際的協力によって解明、水力学、水力機械学、水力機械工業界に貢献しようというもので、日本機械学会、電気協会、造船協会、土木学会、文部省、日本学

術会議などが後援した。

出席者のなかには沖 巖名誉総裁、日本電機工業会長、日本産業機械工業会長、沼知東北大高速力学研究所名誉教授などのほか、スウェーデン、フランス、ソ連、スペイン、インドなど13箇国から合計100名にのぼった。

なお、会期中東北大学高速力学研究所、東芝、富士電機、電力中央研究所、運輸技術研究所、船舶試験所、石川島播磨重工、荏原製作所、航空技術研究所、日立製作中央研究所などを見学した。(服部敏夫)