り, double radial rake に関する切削動力実験を行った。

(A) グループは radial rake を -15° から $+15^{\circ}$ に変化させたが, 動力は r の増加に従って直線的に低下した。(B) グループは secondary radial rake 0° , primary radial rake を -15° から -5° に変えたが, (A) グループより一段低い動力値を示し, (C) グループは secondary radial rake 15° , primary radial rake を -15° から $+10^{\circ}$ に変化させて (B) より更に低い動力値を得た。

2) 各グループの切屑を観察し, double radial rake にすると一般に切屑の長さが長くなり, 切削性がよくなっていることを確め, 更に特定の切屑の一端に構成刃先が生成脱落しつつ繋つた“ひげ”状のものを認めた。

3) 切屑と工具間の接触長さを観察, 測定した結果, double radial rake による切削動力減少は, 接触長さを強制した結果であることを知った。

4) Secondary radial rake は 0° 程度では接触長さ強制の効果が少なく, 15° ではその効果が大きい。

5) Primary radial rake の幅 (L_1) は 1 型当り送りの 1~2 倍が切削抵抗の面からは最も有効であるが, 寿命の面からは実験をする必要がある。

本実験の研究費は昭和31年度社団法人自転車振興会連合会よりの試験研究委託事業費によつて行われたことを付記する。
(1958, 2月14日受付)

文 献

- 1) Kearney & Treker Corporation : 発行のカタログ, C-11B
- 2) J. B. Armitage, A. O. Schmidt : Trans, A. S. M. E. 44 (1944), 633.
- 3) 大越諒, 篠崎襄 : 科研報告, 33 (昭32), 191.
- 4) 星光一 : タンガロイ, 5 (昭32), 24.
- 5) 竹山秀彦 : 精密機械, 22 (昭31), 108.

ミニチュア球軸受について*

——鋼球ラッピングにおけるラップ圧——(2)——

正会員 井 戸 守** 羽 地 務**

On the Miniature Ball Bearings

——On Lapping Pressure for Lapping of Steel Balls (Part 2)

Mamoru IDO & Tutomu HAZI

Experimental results on the lapping of steel balls with the diameter of about 1 mm are as follows :

1. The rate of cutting in lapping steel balls is not proportional to the lapping pressure, owing to the crush of abrasives and the metallic contacts between the ball and the lap. These results are obtained when the abrasives are supplied intermittently with comparatively short intervals.
2. The optimum lapping pressure may exist when the sphericity of steel balls and the rate of cutting are considered. It is expected from the lapping mechanism that the optimum condition is variable due to the condition of lapping composition associated with diameter of the steel ball and feed interval of the composition.
3. The increasing rate of sphericity is connected with the lapping pressure. The maximum increasing rate is obtained when the grits are embedded actively into the lap and when no metallic contact occurs.
4. The rate of cutting performed with nylon lap is not different from that with cast iron lap when the lapping pressure is low. The increasing rate of sphericity is, however, almost proportional to the lapping pressure.
5. Nylon lap is effectively used for the fine finish in regard to the wear of lap, the residual stress, the sphericity, and the surface roughness of the work-piece.

(1) 緒 論

一般の平面ラッピング等と比して、鋼球のラッピングでは同じ砥粒による工作法でも非常な相違がある。すなわちラップと粗材との相対的な滑りによる切削よりも、ラップに埋込まれた砥粒切刃の押込みによる切欠、破壊作用がラップ量の主な原因であり、多少の滑りを伴うラッピング法¹⁾でも顕微鏡による表面観察から明らかなように、切削による長い條痕がなく、切欠あるいは破壊作用の増大された結果、ラップ量が多くなつたものと思われる。従つて直接金属間接触を生じ始める限界圧力内では、砥粒の破壊がなければラップ量はラップ圧に比例し、破壊しても適当な補給方法を講ずれば同様なことが考えられる。限界圧力以上になれば、ラップ圧の1部はその接触圧力となるから比例状態が多少変化することが予想される。

そこでラップ圧はラップ量に最も有効的に働き、濃度とも関係するが、一様な自転軸の変化を与えて真球度に好結果をもたらすようなものでなければならず、表層の加工変質層をも考慮すれば、その限界は自ら定まつてくるものと思われる。このような見解のもとにラップ圧とラップ量および真球度（実際には標準偏差）との関係を実験的に求めて考察した。

(2) 実験の方法

ラッピングの方法は前報²⁾とはほぼ同じであるが、ラップの回転数は58rpm、溝角は 80° ($\alpha = \beta = 40^\circ$)、鋼球の公転直径が85mmで、上下ラップ板を同心としラップ圧力を種々変化せしめラップ量と真球度について実験した。

使用したラップ剤はWA 600#と石油との容積混合比が1:4のもので、ラッピング中5分間隔毎に一定量（ほぼ茶匙2杯）づつ供給した。濃度によるラップ量の変化は予備実験から、その影響の大きいことが分つたので、ラップ剤の供給には特に細心の注意を払つた。

供試資料は同一のものが数多く得られなかつたので、多少の相違があるが8種のものを用いて、表1の如く13種類の実験を行つた。各種別の資料は107個の鋼球からなり、真球度もまた多少異なるものである。鋼球は前報と同じ高炭素クロム鋼で焼入はしていない。

ラップはショアー硬度32の普通鋳鉄の外に、比較の為にポリアミド樹脂（通称ナイロン66）を使用した。ナイロンの硬度の直接測定は行わなかつたが、約ロックウェ

表1 供試資料と実験の種類

資 料	平均直径 (mm)	標準偏差 (μ)	実験の種類	ラップ [*] 圧 (gr)
I	2.0718	3.4	1	20
II	2.0168	3.3	2	10
III	2.1303	3.2	3	40
			4	60
			5	67.3
IV	2.0625	3.2	6	100
			7	120
V	2.1544	4.2	8	30
VI	2.1465	4.6	9	50
			10	80
			11N	80
VII	2.1210	2.5	12N	30
VIII	1.9259	3.0	13N	50

但し N 印はナイロンラップの場合

ル R118 (ブリネルで約20) 位³⁾である。

変質層の厚さの測定は0.063%のHNO₃（温度24°C）による腐蝕法で行つた。鋼球の直径が小さいので明確な判別の為に、各種別のラッピング後夫々80個の鋼球を腐蝕し、15秒毎に精密天秤で重量測定を行い直径の減少率を求めた。

(3) 実験結果と考察

3.1 ラップ圧とラップ量

ラップ圧に対するラップ量として直径の減少量で表わしたのが図1である。この場合の平均減少量は各資料の

図1 ラップ圧とラップ量の関係

* 昭和32年11月16日精機学会東北地方講演会で発表

** 大阪府立大学工業短期大学部

直径が異なるので、減少量そのままでは完全な比較にはな

らないから次の如き補正が必要になる。

直径が相違すれば ラップの同一回転に対する自転および公転が変化する。今ラップ量が鋼球の自転数に比例すると仮定すれば

$$n_2/n_1 = d_1/d_2$$

但し d_1, d_2 は 2 つの鋼球直径, n_1, n_2 は夫々の自転数である。またラップの同一回転角 $\Delta\phi$ に対する鋼球の公転角は直径により異なり, その比は前報より

$$\frac{\Delta S_2}{\Delta S_1} = \frac{1+H_1}{1+H_2}$$

但し

$$H = \left(1 - \frac{d}{2R_A} \cdot \cos \beta\right) \cdot \frac{\cos \theta}{\sin(\beta - \theta)}$$

鋼球が公転角内を回転するときの回転数比は直径に反比例する。従つて上式から

$$\text{ラップ量比} = \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{1+H_1}{1+H_2}$$

今 $\alpha = \beta = 40^\circ$, $R_A = 42.5\text{mm}$, $d_1 = 2.063$, $d_2 = 2.008$ の例の場合に $\theta \approx 3^\circ$ とすればラップ量比は 1.027 となり, d_1 に対して d_2 は約 2.7% の増加になる。

この外に直径の相違による接触面の単位面積当りの平均圧力と接触面積の関係による変化も考えられるが, 定量的関係が不明であり, 径の相違も小さいので実験誤差以下のものと思われる。

図 1 では直径の減少量として表わしたラップ量は, 全体の傾向としてはほぼラップ圧に直線的な比例をしている。ナイロンラップの場合には上凸の或 2 次的比例関係が明らかに認められる。従つて鋳鉄ラップの場合の圧力が 40~70g/個の範囲を除けば, 全体的傾向としては, 前報⁴⁾の計算結果の図 8 における, $r_1 = 0.01$ 以下の圧力に対する接触圧力率の変化からのラップ量の推察と, ほぼ同一結果になる。

鋳鉄ラップで 40~70g/個の範囲のラップ量が少くなっている原因として考えられることは

(i) ラップと鋼球の直接々触の割合。但しこれは純粹の金属間接触ではなく, その間に切粉とか微細化されて切削能の著しく減退した砥粒, 酸化膜あるいは油膜等の存在する接触の意味である。

(ii) 砥粒の切削能の変化とラップの加工硬化。

(iii) ラップ剤の補給方法およびその量または濃度。であるが, これらの影響する割合によつてもその様相が異つてくる。

(i) の接触の割合は, 砥粒と平均粗さにより前報の計算結果から明らかな如く, 多少の相違があるがほぼラップ圧に直線的な比例をしている。本実験に使用した砥粒

は WA 600# であるが, その平均粒径は 0.01mm 以下, 平均粗さの和は前報の表 2 より明らかな如く 0.03mm 以下であるから, 同一圧力下のラッピングでも時間の経過に従つて徐々に接触率が増加し, 図 1 の如くラップ量が経過時間に正比例しなくなる。もしラップ量が鋼球径に反比例するという前記の仮定に従えば理論的にはこの逆の現象が現われる筈である。

そして 40~70g/個の範囲では接触率の増加に伴う他の要素の影響が現われているものと思われる。

ナイロンラップの場合は鋳鉄に比して, 押込硬度は約 $1/5$, 弾性率は約 4 倍であるから, 低圧から既に直接々触が起り接触面積が増加して, 結果としては鋳鉄の場合よりも同一ラップ圧でも接触部の平均圧力が低下しているが, 砥粒の接触し得る面積が大きいため, (ii) とも関連して 60g 以下では鋳鉄ラップとほとんど変わらない。そして本実験の圧力範囲内では鋳鉄のような傾向が現われなかつたものと思われる。

(ii) の影響としては, 両面間の砥粒の状態はその接触中心近くでは主としてラップに埋込まれ, 周辺近くになるに従つて多少の転動⁵⁾を伴つていていると思われる。埋込まれる砥粒は前報の計算における仮定の如く, 両者の押込硬度に反比例した量だけそのままの状態で埋込まれるということではなく, 鋳鉄ラップ中の機械的に軟かくて脆いグラフアイト, または比較的硬度の高いパーライト組織により或程度の破碎を考慮せねばならぬ。

この砥粒の破碎あるいは切刃の磨耗は, ラップ面の加工硬化によつても促進される。

鋼球 1 個当り 80g のラップ圧でラッピングしたときの, 鋳鉄ラップの接触表層部の硬度を微小硬度計 (荷重 200 g) で測定したときの平均結果は

地金...102, 中心部...164, 周辺部...143,

となり, 表層硬度は明らかに上昇している。これは純粹の加工硬化の外に, 埋込まれた砥粒とか切粉が多分に影響しているものと思われる。このことはナイロンラップを使用したときのラップの断面写真図 2 からも明らかに類推できる。

従つて同一圧力下におけるラッピングでは, ラップ剤の補給の有無あるいは方法とその量によつても異なるが, 本実験の如く間歇的な補給法の場合は, ラップ量が経過時間に正比例しない 1 因となつていているものと思われる。

圧力が変化すれば砥粒の破碎, 切刃の磨耗の程度も異つてくる。

砥粒の貫入強度, 破碎および磨耗抵抗については小林⁶⁾, Wagner⁷⁾ 等による研究結果がある。小林によれ

(1) 倍率 $\times 165$ (但し原図縮少率 $\frac{3}{4}$)

(2) 時計用洗滌ブラシをかけた場合

図 2 ナイロンラップ面の砥粒及び切粉の状態

ば、砥粒が細粉化される静的破碎強度は WA で約 2 kg 位とみられる。従つて破碎の程度によつてはこの圧力以下でも発生しているわけである。これは供試砥粒が #40 のものについての場合であるが、これから鋼球とラップ間の #600 の砥粒を類推すれば、限界圧力以下では主として切刃の磨減と貫入強度の変化が起り、限界圧力以上では真実接触面積（接触個数とその面積）とグラフアイト（普通鋳鉄ではその平均巾は約 0.01~0.02mm）の分布状態に關係する砥粒の破碎が主として発生する。直接々触面ではラップの降伏応力程度の大きな圧力が作用しているが、その面積は例えば鋼球 1 個当りの荷重が 50g の場合では、#600 砥粒の投影面積の数%程度である。砥粒の破碎は工程の経過時間に比例して促進される。

従つて図 1 の圧力が 50~60g 迄の範囲では、切刃の磨減と同時に破碎が起り、単位面積当りの分布数が増加しても押込みに要する圧力が不足している状態であり、圧力が大きくなれば破碎が活潑になると共に、微細化された砥粒の排除が多くなつて⁸⁾、補給法とも関連するがラップ剤の新陳代謝が盛んになりラップ量が増大する。

ナイロンラップを使用した場合、同一圧力における鋳鉄ラップよりも接触面積は増加するが、加工に寄与する部分はラップの磨耗条痕から推察すれば、その増加は僅かであるから結果としてはラップ量は前報 (10) 式の H' の比に近い比例状態になる筈である。しかるに実験

結果では 60g 以下では鋳鉄と殆んど変わらない。これは界面表層の硬化の外にナイロン-鋼の磨耗特性が原因と思われる。

即ちナイロンはその融点は低い、潤滑が適当に行われて界面の温度上昇が融点以下の適当な温度内であればナイロンの耐磨耗性が少く⁹⁾、鋼球に対して磨耗作用の行われていることが予想される。このことはラッピング後の鋼球表面が、鋳鉄ラップよりも白色を呈していることから推察できる。

圧力が高くなつてもナイロンラップでは、砥粒の鋼球への押込量が鋳鉄ラップのような比例にはならない。図 2 の (2) の如くブラシをかければ、大部分の砥粒は簡単に剝離する。即ち弾性率が大きくて見掛上の表面硬化は、考えられる圧力範囲内では極端に大きくはならず、ラップ量の増加も少い。ラッピング後の表面は鋳鉄に比して非常に粗く、砥粒の破碎の少いことから分る。

3.2 ラップ圧と真球度

図 3 は横軸の鋼球 1 個当りの圧力に対する標準偏差の減少割合（これを仮に仕上率とよぶ）を示す。仕上率は

図 3 ラップ圧と仕上率の關係

元の資料の標準偏差に対する減少した量の百分率であり、これが 100% とは標準偏差が 0、即ち真球度が 0 を意味している。尚点線は最初の標準偏差である。

この結果によれば、真球度はラップ圧によつてかなり変化することが分る。即ち圧力が小さい間は圧力と共に徐々に上昇し、30~50g の範囲では悪くなり、これから再び上昇するが 100g 以上では再び下降する。

真球度の上昇割合がよいということは、鋼球の自転軸の変化が一様であり、面の凸部がラップに對した場合でも、両面の滑りによる“逃げ”が少い場合であるとすれば、図1のラップ圧とラップ量の関係と関聯する。即ち砥粒が破碎しないと仮定すれば、圧力の上昇と共に砥粒のくいこみが増加して、巨視的摩擦即ち“引掛り”が多くなり真球度が漸増する。更に圧力が大きくなつて金属間接触が多くなれば、圧力に対する摩擦の比例が変化して“逃げ”が多くなり真球度が下る。30~50gの範囲では圧力とラップ量との関係における砥粒の破碎、および接触面の増大を考慮したと同様な考え方から説明がつく。無論1工程の鋼球径の平均値からの凸起であるから、粗さと標準偏差の大きい場合にはより大きい摩擦をもたせなければならないので、小さい場合よりはラップ圧を大きくせねばならない。

このように考えれば、圧力とラップ剤の濃度との関係および補給方法とその量等は、單にラップ量のみならず真球度にも重要な影響をもつことが予想される。

ナイロンラップでは砥粒の破碎が少いので、ラップ圧の大きい程真球度はよくなる。

3.3 ラップ圧と表面変質層

図4はラップ圧に対する変質層の平均厚さの測定結果

図4 ラップ圧と変質層の関係

である。铸铁ラップでは70g 迄はほぼ直線的に増加し、それ以上では増加の割合が多少大きくなっている。これは恐らく直接々触の影響であろう。

ナイロンラップでは押込硬度が低く弾性回復も大きいので、実験の圧力範囲内では1μ以下である。

変質層と磨耗については多くの研究¹⁰⁾があり、一般にはこの関係は比例するといわれる。従つて特に摩擦の少い軸受として高精度を要求される小鋼球では、最終仕上における変質層が重要である。また鋼球ラッピングはその機構からピーニング作用により、普通のラッピングと

同様に表層には残留圧縮応力¹¹⁾が考えられ、これがラップ圧と共に増減し、直接々触を伴えば更に助長されるから、最終仕上用としてのナイロンはブラストクリーニングにおけると同様に磨耗も少く効果的であるといえる。

(4) 結 論

以上の実験結果とその考察を要約すれば、

(1) 鋼球ラッピングにおけるラップ圧とラップ量は、砥粒の破碎および直接々触等の原因で一次的な比例はしない。但し比較的密な間歇的補給の場合である。

(2) ラップ圧は真球度をも考慮すれば、最適ラップ圧の範囲がある。ラッピングの機構からその最適ラップ圧は、鋼球径に対するラップ剤、補給方法およびその量等の条件により異なることが予想される。

(3) 真球度はラップ圧と密接な関係があり、砥粒の押込作用が活潑で、しかも直接々触の少いラップ圧の場合に最もその上昇割合がよい。

(4) ナイロンラップによるラップ量は、ラップ圧の小さい範囲では铸铁ラップと殆んど変わらないが、圧力が大きくなつてもその増加は少い。しかし真球度はほぼ圧力に比例する。

(5) 変質層あるいは残留応力と上記(4)の結果および磨耗、表面仕上等の点からは、最終仕上用としてのナイロンラップは効果的である。(1958, 1月6日受付)

- 1) 井戸：ミニチュア球軸受について，精密機械，23 (1957)，4，127.
- 2) 井戸：1)と同じ
- 3) 折美外：新しいプラスチック材料，日刊工業新聞社，昭30年，148頁
- 4) 井戸，羽地：ミニチュア球軸受について，一ラップ圧(1)―精密機械，24(1958)，4，161
- 5) Taber：訳，自由転りの摩擦機構，機械の研究，9 (1957)，7，875.
- 6) 小林：バイレックスガラスの粗研削法の研究，精密機械，20 (1954)，6，208.
- 7) Wagner：New Concepts of Abrasive Properties as Affecting Grinding Performance，Mech. Engg.，March，(1950)，225.
- 8) Lichtenberger によれば油膜の薄いものでは、大きい砥粒が排出されてラップ量が減少するといわれているが、油圧の影響はRabinowiczによれば相当大きくなることが予想されるので、これによる砥粒の排除を考慮せねばならぬ。
- 9) Wall：Nylon in Bearing & Gears. Prod. Engg.，21 (1950)，July，102. 又は松原：最近の磨耗理論とその応用，機械の研究，4 (昭28)，2，127.
- 10) 例へば佐藤：ラッピング仕上面の性質，機械の研究，4 (昭27)，4，241.
- 11) Letner & Snyder：Grinding & Lapping Stresses in Manganese Oil Hardening Tool Steel，Trans. ASME，75 (1953)，5，873.