ゴムの研削加工に関する研究 (第2報)*

—極低温研削法による研削特性—

北 嶋 弘 一** 田 中 行 雄** 前 田 諭 志***

Study on Rubber Grinding (2nd Report)

—Grinding Characteristics by Method of Cryogenic Grinding—

Koichi KITAJIMA, Yukio TANAKA and Satoshi MAEDA

In this paper, the grinding characteristics in cylindrical plunge grinding under the cryogenic condition by using reversible properties of rubber materials are discussed comparing with the conventional process. The main results obtained are as follows: (1) Under the cryogenic grinding, transient and spark-out times are reduced compared with the conventional process and normal grinding force increases with the increase of dynamic elastic modulus of rubber material. (2) The method of cryogenic grinding makes it possible to grind normally rubber materials which are impossible to do in the conventional process in order to have an effect upon grinding temperature. And, this method prevents the over-cut by expanding with heat and increases the cutting ratio. (3) In this process, the finely powdered chips are generated and the loading on grinding wheel can be prevented. The saw-toothed type abrasion pattern generated on ground surface by the conventional process disappears and its surface roughness is improved remarkably.

Key words: rubber grinding, cryogenic process, cylindrical plunge grinding, normal force, chips, ground surface roughness

1. 結 言

ゴムをはじめとする高分子材料は、加工品位向上の要求より研削加工の需要が高まっている。特に、ゴム材料は強度や弾性率が金属材料と比べて著しく低いが、回復可能な伸びが数百%にも及ぶという特徴を有しており、工業材料としては強度部材よりもむしろ機能部材として広範に利用されている。また、ゴム材料の弾性は変形に伴う分子配列の変化に対応するエントロピー変化によるもので、ポテンシャルエネルギー変化による金属材料の弾性とは本質的に異なり、その研削加工については種々の問題点がある。すなわち、ゴム材料の研削加工において、ゴム状弾性に伴う弾性変形は軟質ゴムになるほど大きくなるために切残し量が増大するとともに、その仕上面に特有ののこ歯状のしま模様が生じ¹⁾、機能部材として使用する場合の摩擦特性に大きな影響を与える²⁾。さらに、ゴム材料は熱依

存性が非常に大きいために、研削中に発生する研削熱がその物理的性質を変化させ、弾性率の低下をもたらすとともに仕上面性状に対しても悪影響を及ぼす。

そこで、本研究はゴム材料のゴム状弾性がある温度範囲内のみ存在し、極低温下（ガラス転移点以下）では失われてガラス状の硬質状態に変化し、逆に元のゴム状弾性を示す温度に戻ると物理的性質を損なうことなく元の状態に戻るという可逆的性質を利用して、極低温下においてゴム材料の研削加工を行うことを目的としたものである。つまり、前述のゴム材料の弾性変形および研削熱の影響を抑制して、特に通常の研削法では困難な軟質ゴムの研削の可能性を試み、さらにはその寸法精度ならびに仕上面性状の向上を図ろうとするものである。本論文では、定切込み円筒プランジ研削を行い、その研削過程、研削特性、切りくず形状および仕上面性状を極低温研削法と通常の研削法について比較検討した結果を述べる。

2. 供試材料、実験装置および実験方法

ゴム材料は、広範囲の温度領域にわたってゴム状弾性を示す特性を有している。本実験に使用したゴム材

* 原稿受付 昭和60年12月26日、昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和58年10月14日）にて発表

** 正 会 員 関西大学工学部（吹田市山手町3-3-35）

*** 正 会 員 帝人（株）（茨木市耳原3-4-1）

Fig. 1 Temperature dependency of rubber

Table 1 Recipe of rubber (wt%)

a) CR, NR, NBR

	CR	NR	NBR
CR-WRT	100	—	—
Crepe 1st class	—	100	—
NBR 1042	—	—	100
St-acid	1	1	1
ZnO	5	5	5
MgO	4	—	—
Sulfur	—	1	1
Accelerator DM	—	1.5	1.5
Accelerator TT	—	0.2	0.2
Sunceller 22 C	0.7	—	—
MT carbon	35	—	35
SRF carbon	—	5	—
CaCO ₃	—	25	—
DOP	—	—	30
TP-95	30	—	—
Vistanex L-200	—	15	—

b) SiR

	HTV	RTV
SE 1120 U	100	—
KE 103 RTV	—	100
RC-4	1	—
Catalys 103	—	5

Table 2 Mechanical properties of rubber

Kinds of rubber	Hardness	Tensile strength MPa	Elongation %	Tear strength MPa	Glass transition point °C	Dynamic modulus of elasticity	
						R. t. MPa	C. t. 10 ³ MPa
CR	40	11.9	600	2.55	-20	1.4	2.0
NR	37	19.7	760	2.65	-54	0.4	1.2
NBR	39	11.7	880	1.96	-34	1.1	1.1
SiR (HTV)	34	7.35	730	2.55	—	—	—
SiR (RTV)	25	—	200	—	—	—	—

Room temperature; 23°C, Humidity; 71%, Cryogenic temperature; -198°C

料は、一般に工業製品として広く活用されているクロロブレンゴム (CR)、天然ゴム (NR)、ニトリルブタジエンゴム (NBR) およびシリコンゴム (SiR) の 4 種類である。SiR を除く 3 種類のゴム材料の温度依存性を粘弾性測定装置 (レスカ製, RD 1100-AD 型) によって求めたものを図 1 に示す。動的弾性率は、ガラス転移点以下になるとミクロブラウン運動が制限されるために急激に増大しており、ゴム材料はゴム状弾性を失って完全にガラス状に硬化する。したがって、本実験では研削に際してゴム材料をガラス転移点以下に保つことが必要である。表 1 にゴム材料の配合割合を、表 2 にそれらの機械的性質を示す。ここで、SiR には熱硬化型 (HTV) と常温硬化型 (RTV) の 2 種類があり、

前者は他のゴム材料と同様に加熱 (約 160°C) して加硫成形を行うのに対して、後者は常温で加硫成形する点で相違する。SiR は、耐熱性・耐油性・耐薬品性に優れるが、機械的強度が他のゴム材料に比べて著しく劣っている。

実験には、図 2 に示すような M 社製万能工具研削盤を使用し、定切込み円筒プランジ研削を行った。極低温下における研削方法として、液体窒素を利用して次のように行った。すなわち、研削前にゴム材料を液体窒素中で冷却 (-198°C) してゴム状弾性を完全に失った状態にしたのち、研削を開始する。研削中、研削熱によるゴム材料表層の温度上昇を防止するため、液体窒素を研削点に連続的に噴射した。その実験条件は表 3 に示すとおりである。研削仕上げ面の粗さは、セメント状のレプリカ (商品名: Fasimilike) による転写法を用いて測定した。

3. 実験結果とその検討

3.1 プランジ研削過程

プランジ研削加工においては、砥石と工作物間の接触剛

Fig. 2 Experimental apparatus

Table 3 Grinding conditions

Grinding wheel	GC 60 L 10 V (Porous type)
Rubber	Outer diameter × Width : 150 × 13 (mm) CR (Chloroprene rubber) NR (Natural rubber) NBR (Acrylonitrile butadiene rubber) SiR (Silicone rubber) Outer diameter × Width : 60 × 12 (mm)
Wheel speed	$V = 8.1\text{--}27.5$ m/s
Rubber speed	$v = 1.91$ m/s
Plunge speed	$v_p = 9.1$ $\mu\text{m/s}$

Fig. 3 Plunge grinding process

性や砥石摩耗に起因するかつぎ現象が存在し³⁾、工作物がゴム材料である場合にも同様の傾向を示す¹⁾。

図3は、ゴム材料を極低温研削法および通常研削法によって研削した場合のプランジ研削過程を示したもので、両研削法において研削サイクル中に過渡、定常およびスパークアウトの3研削状態が存在している。まず、通常研削法において、過渡状態はゴム材料のゴム状弾性によって砥粒切れ刃と弾性的に接触するのみで、砥石台移動量のすべてがかつぎ量となる弾性接触領域と、かつぎ量の増大に伴う砥粒切れ刃の摩擦力によってゴム材料表面に引裂き傷を発生させる研削開始領域よりなる。さらに、定常状態は法線方向研削抵抗とゴム材料の弾性回復力とが平衡してかつぎ量が一定となり、掘り起こし作用⁴⁾によって切りくずを生成し、研削量の増加率が砥石台移動量のそれと等しくなる領域である。この状態で砥石台の移動を停止するとス

パークアウト状態に入り、かつぎ量の減少とともに法線方向研削抵抗および研削量も減少し、ゴム材料の弾性変形量や研削系の剛性などによって決定される一定値（限界かつぎ量）にそれぞれ収束する。一方、極低温研削においては、ゴム材料がゴム状弾性を失ってガラス状となるため、過渡状態では引裂き傷を発生せず、ラビング、プラウイング等の塑性変形領域が存在し、定常状態では砥粒切れ刃の切削作用による切りくず生成領域となる。このことは、後述の研削仕面上に掘り起こし作用によるゴム材料の研削に見られる特有のこの歯状しま模様が全く現れず、砥粒切れ刃による切削条痕が研削方向と平行に認められることから明らかである。スパークアウト状態では、通常研削法の場合と同様に研削系の剛性に起因する切残しが存在する。これらのことより、ゴム材料の極低温研削における研削サイクルは通常研削と変わらないが、過渡およびスパークアウト状態の時間は短縮され、法線方向研削抵抗は表2に示したように動的弾性率が急増するために顕著な増加を呈していることがわかる。

3.2 研削特性

極低温研削法では、上述のように法線方向研削抵抗 F_n が通常研削法に比べて非常に増大することが判明したが、ゴム材質によっても大きな影響を受けることが予想されるので、次に検討を行った。

図4は、耐摩耗性や耐熱性に影響を与えるカーボンブラックを配合したCR, NR および NBR のゴム材料の F_n を両研削法について比較したものである。いずれのゴム材料も極低温研削法における F_n は相当増大しており、特にNRの増加割合が高いことがわかる。通常研削法において、 F_n はそれぞれのゴム材質の動的弾性率に従ってNR, NBR, CRの順に大きくなっている。それに対して、極低温研削法ではNRとNBRの F_n の順序が入れ替わっているが、表2に示したようにガラス転移点以下になると両者の動的弾性率が逆転することによるもので、これはカーボンブラックの性質の相違に起因するものと推察される。

図5は、ホワイトカーボン配合のSiRの F_n について示したものである。(a)図のHTV型ゴムにおいて、通常研削法の過渡状態で F_n が一時的に急増する特異な現象が認められる。これは、HTV型SiRが熱影響を受けやすい性質を有している⁵⁾ため、弾性接触領域においてゴム表面が溶融して砥石作業面に溶着し、 F_n が急増したものと考えられる。その急増した F_n がSiRの引裂き強度を越えると引裂き形切りくずを排出しはじめ、 F_n が減少して定常状態に至る。したがって、極低温研削法によってその原因となる熱の発生を抑制

(a) Conventional grinding

(b) Cryogenic grinding

Fig. 4 Variations of normal grinding force for CR, NR and NBR

すると、このような特異な現象は現れず、正常な研削が可能になることがわかる。また、(b) 図の RTV 型ゴムは、表 2 に示したようにゴム硬度が極端に低いため、ゴム材料の弾性変形が著しく大きくなり、 F_n が引裂き強度を越えて研削が開始されるとかつぎ量が急減し、 F_n も急減するという現象を繰り返す断続研削状態を呈する。しかし、極低温下においてゴム材料の弾性変形を抑制すると、他のゴム材質と同様に正常な研削を行えることが明らかである。

次に、両研削法における切込み率（理論研削量に対する実研削量の百分率）の相違を各種のゴム材質について示したものが図 6 である。極低温研削法において、カーボンブラック配合の CR, NR, NBR の切込み率は、通常研削法のそれより上昇しており、その中でも熱影響を最も受けやすい NR は 20% の向上が認められる。一方、ホワイトカーボン配合の SiR は、熱膨張係数が大きいために通常研削法で摩擦熱や研削熱の影響を受けて熱膨張を生じ、オーバカットされて切込み率が 100% を越している。しかし、極低温研削法によって熱影響を除去すると、オーバカットを防止することができる。

(a) SiR (HTV)

(b) SiR (RTV)

Fig. 5 Variations of normal grinding force for SiR

Fig. 6 Ratio of stock removal

3.3 切りくず形状と仕上面性状

ゴム材料の研削においては、前述のように掘り起こしおよび引裂き作用によって切りくずが生成される。両研削法の定常研削状態で採取した切りくずの一例を図 7 に示す。通常研削法での切りくずは、いずれのゴム材質においても極低温研削法のものに比較して大きく、研削熱の影響による相互間の溶着が認められる。それに対して、極低温研削法での切りくずは、ゴム材料の動的弾性率の上昇に伴って砥粒切込み深さが減少するため、非常に小さい形状となっている。また、極

Fig. 7 Micrographs of chips

低温研削法では切りくずの溶着も発生せず、砥石作業面への目づまりを防止することができる。

次に、定常研削状態におけるゴム仕上面の顕微鏡写真を両研削法について対比したものを図8に示す。通常研削法では、ゴム仕上面に Abrasion pattern と呼ばれる特有のこ歯状しま模様を生じており、これはゴム材料の弾性変形に伴うスティックスリップによる周期的掘り起こし作用に起因するものである⁶⁾。一方、極低温研削法によるゴム仕上面には、砥粒切れ刃の切削作用によって研削方向と平行に切削条痕が残っており、このこ歯状しま模様は常温状態に戻しても完全に消失している。これらのゴム仕上面をレプリカに転写し、研削方向のプロフィールを粗さ計で測定したものの一例を図9に示す。これより、極低温研削法による仕上面粗さは非常に向上することが明らかである。

Fig. 8 Micrographs of ground surface

Fig. 9 Profiles of ground surface

Fig. 10 Relationship between grinding speed and surface roughness for various rubber materials

図10は、各種のゴム材質について研削速度と仕上面粗さの関係を示したもので、いずれのゴム材質においても金属の研削と同様に研削速度の増加に従って仕上面粗さは向上している。極低温研削法では、ゴム材料がゴム状弾性を失ったガラス状態で研削が行われるため、砥粒切込み深さが著しく減少し、その仕上面粗さは通常研削法に比べて2~5倍向上することがわかる。特に、CRは表2に示したように極低温時の動的弾性率が相当高くなるために、顕著な仕上面粗さの向上が見られる。一方、RTV型SiRは図5で明らかにしたように非常に軟質で、熱影響を受けやすい性質を有しているため、通常研削法において研削速度が上昇した場合に研削が不可能となるが、極低温研削法を採用することによって安定した研削が可能となり、仕上面粗さも向上する。

4. 結 論

ゴム材料の可逆的性質を利用して極低温下での研削

加工を試み、その円筒プランジ研削における研削過程および研削特性について室温下での通常の研削法と比較検討した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 極低温研削法においては、動的弾性率の増加により砥石との接触剛性が高くなるため、研削サイクル中の過渡およびスパークアウト状態の時間は通常研削法に比べて短縮され、法線方向研削抵抗は増大する。
- (2) 極低温研削法によって、通常研削法では熱影響のために研削不可能なゴム材料を正常に研削することができ、熱膨張によるオーバカットを防止するとともに切込み率を増大させることができる。
- (3) 極低温研削法では、微粉状の切りくずを生成して砥石作業面への溶着を防ぐことができ、通常研削法において研削仕上面に生じるのこ歯状しま模様は完全に消失して切削作用

による条痕を呈し、仕上面粗さが非常に向上する。終わりに、本研究を行うにあたりゴム材料等についてご配慮いただいた山内ゴム工業株式会社技術部・伊倉賢一郎部長、広瀬三昭室長はじめ関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 北嶋弘一、古谷一彦、田中行雄：ゴムの研削加工に関する研究（第1報）、精密機械、47, 3 (1981) 326.
- 2) 田中行雄、北嶋弘一、鬼丸貞久：ゴム研削表面の摩擦特性について、昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1981) 894.
- 3) 岡村健二郎、中島利勝：研削の過渡特性（第1報）、精密機械、38, 7 (1972) 580.
- 4) 森川竜一：ゴムの研削加工の研究（第1報）、日本機械学会論文集（第3部）、28, 193 (1962) 1113.
- 5) 和田 正：シリコンゴム加工技術、日刊工業新聞社 (1979) 24.
- 6) A. Schallmach: Friction and Frictional Rise of Wedge Sliders on Rubber, Wear, 13, (1969) 13.