

# ゴムの滑りおよび転がり摩擦と接触面の挙動に関する研究

著者	門傳 徳久
著者別名	Monden, Naruhisa
雑誌名	博士学位論文要旨 論文内容の要旨および論文審査結果の要旨 / 金沢大学大学院自然科学研究科
巻	平成16年12月
ページ	123-130
発行年	2004-12-01
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/16610">http://hdl.handle.net/2297/16610</a>

氏名	門 傳 徳 久
生年月日	
本籍	東京都
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 601 号
学位授与の日付	平成 15 年 9 月 30 日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第 4 条第 1 項）
学位授与の題目	ゴムの滑りおよび転がり摩擦と接触面の挙動に関する研究
論文審査委員(主査)	内山 吉隆（工学部・教授）
論文審査委員(副査)	神谷 好承（自然科学研究科・教授） 山田 良穂（工学部・教授） 梶川 康男（自然科学研究科・教授） 中本 義章（工学部・教授）

## 学位論文要旨

In this study, the contact and the slip region of rubber under sliding and rolling friction were investigated.

The coefficients of friction on the rubber surfaces having abrasion patterns, which were abraded by abrasive cloth were examined. The effects of sliding direction and the spacing of the abrasion patterns on the coefficients of friction were investigated. From the experiments, the variations of the coefficients of friction were explained by the variation of contact area. The coefficients of friction on the abrasion patterns were examined with same direction of abrasion by abrasive cloth and the counter direction of abrasion. The coefficients of friction on the abrasion patterns in a direction of abrasion were from twenty-five to fifty percents larger than those rubbed in a counter direction of abrasion. When the abrasion patterns were rubbed in a direction of abrasion, the coefficients of friction increased because of the increment of apparent applied load by friction force. The coefficients of friction decreased when the spacing of abrasion patterns and applied load increased.

Rolling-sliding friction was investigated for three SBR (styrene-butadiene rubber) specimens including silica-filled, HAF carbon black-filled, and SAF carbon black-filled SBR. When a rubber wheel was rolled against a glass disk, the coefficient of friction varied with the slip ratios. The coefficient of friction for the silica-filled SBR showed the highest value of the rubber specimens examined under various slip ratios. The contact areas of silica-filled SBR were larger than those of the carbon black-filled SBRs, as indicated the modulus of the silica-filled SBR showing the lowest value. The contact area during rolling-sliding friction was always smaller than those during the static contact. The friction force at the unit contact area for the silica-filled SBR under braking and driving was higher than those of carbon black-filled SBRs.

### 1. 緒言

ゴム材料は、摩擦材料として使用されることが多い。ゴム部品表面と相手部品表面との接触面では、必ず摩擦および摩耗現象が発生している。また、自動車用タイヤやロールでは滑り摩擦だけでなく同時に転がり摩擦が起こっている。これら摩擦および摩耗は製品設計に大きく影響するため、ゴムの摩擦・摩

耗のメカニズムを明らかにすることは重要である。

ゴムの滑り摩擦において、ゴムが摩耗した表面では、しばしば摩擦方向と直角に周期的突起が形成される。これはアブレーションパターンと呼ばれ、主にゴム材料で生じるもので、自動車タイヤやロールなどで見受けられる。この歯形状のアブレーションパターンは、それが研磨された方向にこの歯の目が立つようにパターンが生成される。この歯形状に対し、別の相手面とのこの歯の目が立つ方向に摩擦したときや、それと反対方向で、この歯の目に引っかかりにくい方向と摩擦したときについて、摩擦方向による摩擦係数の異方性についての研究はほとんどなされていない。

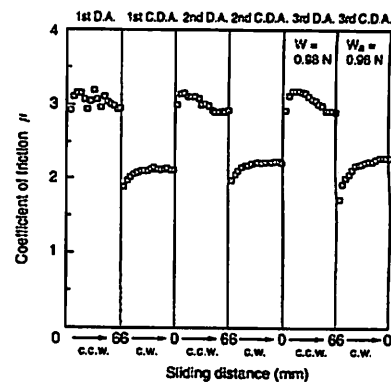
滑り転がり摩擦においては、接触面が相手面に対し滑り摩擦を行っている領域と滑らずに接触している領域が存在する。自動車用タイヤやロールの性能向上を行うには、転がり摩擦および転がり滑り摩擦現象において、ゴムおよび相手面との間の接触状況や摩擦係数とスリップ比の関係、それに対するゴム材料の違いによる影響などを把握する必要がある、製品設計において重要な課題である。

そこで、本研究では、アブレーションパターン面の摩擦について、摩擦中のゴム試料表面の状態を直接観察し、摩擦係数の摩擦方向による異方性特性について明らかにした。また、滑り転がり摩擦において、同様に摩擦中のゴム試料表面の状態を直接観察し、スリップ比に対する摩擦係数、接触面積の関係のゴム試料による違いについて明らかにした。

## 2. ゴムのアブレーションパターン面の摩擦の異方性

アブレーションパターン面の摩擦方向による異方性について、摩擦係数に対するパターン間隔、実験荷重の影響について調べた。

実験には、ピンディスク型摩擦試験装置を用いた。摩擦実験中の接触面は相手面ガラス円板を通して光干渉法を用い観察した。ゴム試料は天然ゴム試料を板状に加硫後、試料ホルダーに接着したものを一片4mm、厚さ0.5mmの直方体加工して使用した。パターン間隔が0.30mm、0.42mm、0.47mmの試料を用意した。これらアブレーションパターン面を形成した当り出し荷重はそれぞれ0.98N、1.47N、1.98Nである。相手面ガラス円板は直径120mm、厚さ2.8mmのものを用い、摩擦軌道直径200mmで摩擦実験を行った。



(a)  $W = 0.98 \text{ N}, W_n = 0.98 \text{ N}$

摩擦実験は摩擦速度4.1mm/sで、4種類の実験荷重、0.47N、0.98N、1.47N、1.98Nで行った。摩擦方向について、Fig. 1に示す。この歯状のアブレーションパターンを逆なでる方向を逆方向、D.A.(Direction of Abrasion)、その反対方向を順方向、C.D.A.(Counter Direction of Abrasion)とする。

当り出し荷重 $W_0$ および実験荷重 $W$ の変化について摩擦距離と摩擦係数の関係をFig.2に示す。逆方向に摩擦した場合の方が順方向に摩擦した場合よりも摩擦係数が高い。実験荷重を2倍にした場合、摩擦係数は逆方向で約23%、順方向で約18%減少した(Fig.2(b))。当り出し荷重が2倍になり、パターン間隔が拡大することにより、摩擦係数は

逆方向で約16%、順方向で約5%減少した(Fig.2(c))。いずれの場合も摩擦距離の増加により摩擦係数は増大した。また、摩擦回数に関し、順方向に摩擦した場合の方が摩擦係数の変化が少なく安定した数値を示した。

Fig. 3に、摩擦係数と荷重の関係を示す。逆方向に摩擦した場合の摩擦係数の方が順方向に摩擦した場合よりも、各当り出し荷重で高く、その差は、当り出し荷重が増加するに従って減少する傾向が見られた。また、両方向とも実験荷重の増加により摩擦係数が減少した。

摩擦係数の当り出し荷重による変化は順方向に摩擦した場合のほうが少ない。

アブレーションパターンについて、Fig.4に示すような力の作用する部分を、摩擦方向(x軸)と傾角 $\theta$ をもち、点Dで回転自由な、長さ $L$ の剛体棒とみなした簡易モデルで考えると、力の釣り合いから静摩擦係数 $\mu$ について次式を得る。

$$\mu_{D.A.} = F_{D.A.} / W = \mu(1 - \mu \tan \theta) \quad (1)$$

$$\mu_{C.D.A.} = F_{C.D.A.} / W = \mu(1 + \mu \tan \theta) \quad (2)$$

上式を実験結果に当てはめた結果をFig. 3に示した。逆方向と順方向の摩擦係数の差は荷重が増加するとともに減少し、荷重が大きくなるとその差は小さくなり、当り出し荷重が大きく、パターン間隔が大きい程、

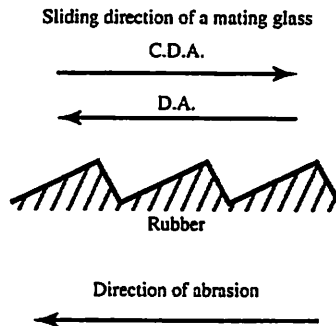
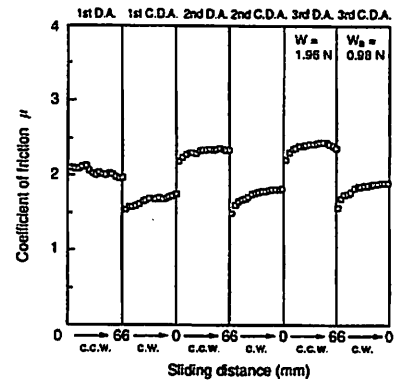
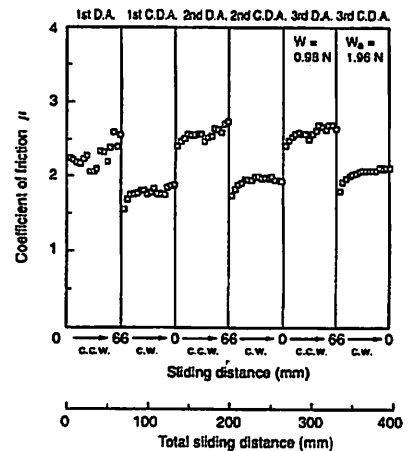


Fig. 1 Sliding direction of abrasion patterns: C.D.A. (counter direction of abrasion) D.A. (direction of abrasion)



(b)  $W = 1.96 \text{ N}, W_0 = 0.98 \text{ N}$



(c)  $W = 0.98 \text{ N}, W_0 = 1.96 \text{ N}$

Fig. 2 The coefficients of friction under various applied loads  $W$  are plotted against sliding distance on the rubber surfaces abraded by abrasive cloth AA#240 under loads  $W_0$  of 0.98N and 1.96N.: c.c.w.: Counter clockwise. c.w.: Clockwise.

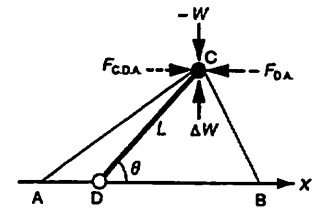


Fig. 4 Rigid rod model of the abrasion patterns.

摩擦実験中の荷重の増加に伴う摩擦係数の低下が大きいという傾向を良く表している。

Fig. 5に、接触面の観察によって求めた、真実接触面積と荷重の関係を示す。いずれの当り出し荷重の場合も、順方向よりも逆方向に摩擦した場合の方が真実接触面積が大きい。また、実験荷重の増加に伴い、接触面積も増加している。当り出し荷重が大きくなる、すなわちアブレーションパターンの舌状突起が大きくパターン間隔が広くなるほど、接触面積は減少した。

### 3. ゴムの転がり滑り摩擦と接触面の挙動

滑り転がり摩擦において、スリップ比に対する摩擦係数、接触面積の関係のゴム試料による違いについて明らかにした。

実験においては、ゴム輪が相手面ガラス円板上で接触し、それぞれ異なる速度で回転する摩擦試験機を使用した。摩擦実験中の接触面は相手面ガラス円板を通して観察した。

ゴム試料について、SBR(styrene-butadiene rubber)を母材に充填剤が異なる3種類(シリカ, HAFカーボンブラック, SAFカーボンブラック)の材料について直径62mm, 厚さ12.2mmの円板形状のものを使用した。配合および機械的特性をTable 1, Table 2に示す。相手面ガラス円板は直径120mm, 厚さ2.8mmのものを用い、摩擦軌道直径200mmで摩擦実験を行った。ゴム試料およびガラス円板の速度を変化させ、様々なスリップ比について実験を行った。ゴム輪が相手面ガラス円板と滑り転がり接触を行う場合、ゴム輪の外周速度 $v_r$ , 相手面ガラス円板上のゴム輪軌道における回転速度 $v_g$ として駆動時および制動時のスリップ比はそれぞれ $s_D = (v_g - v_r)/v_r$ ,  $s_B = (v_g - v_r)/v_g$ とする。転がり滑り摩擦の場合、計測される摩擦力を垂直荷重で除して制動力または駆動力係数と呼ぶ。固着域が無い全滑り状態の場合、滑り摩擦係数が得られる。実験は、すべて垂直荷重9.8N, 室温23°Cで行った。ゴム輪の外周速度 $v_r$ および相手面ガラス円板上のゴム輪の軌道速度 $v_g$ をそれぞれ0から40mm/sまで可変し、スリップ比 $s$ が-1から+1までの摩擦実験を行った。

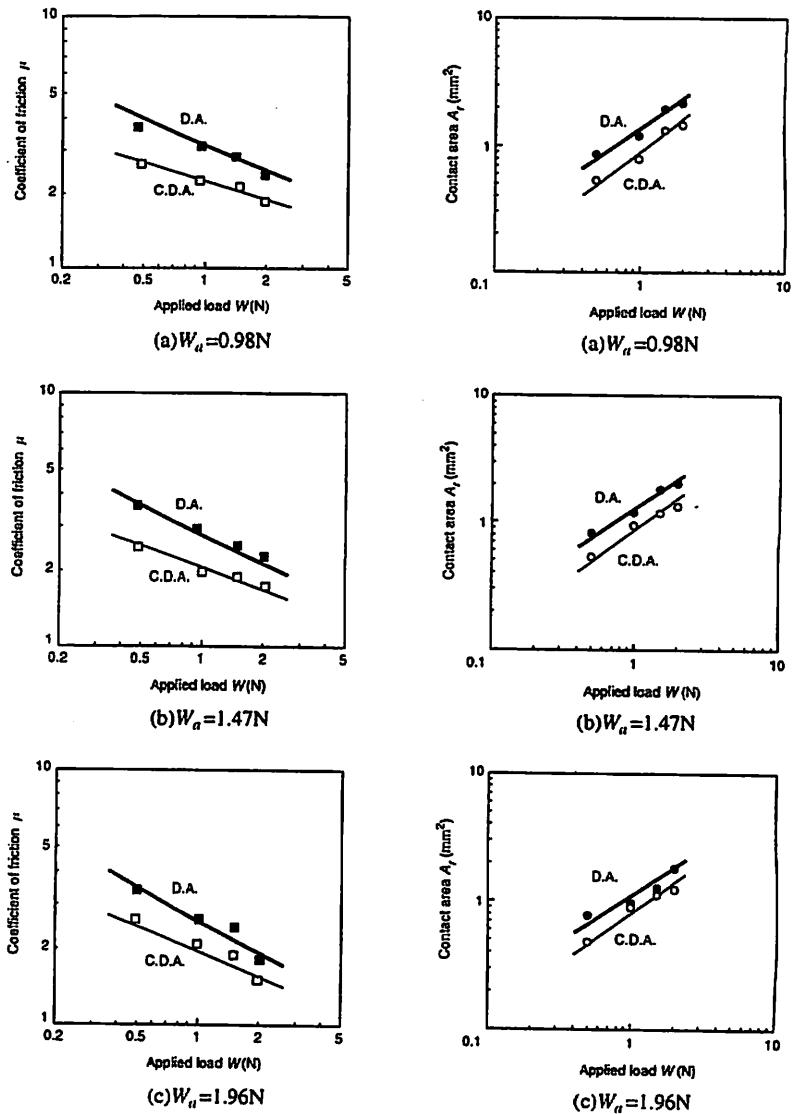


Fig. 3 The coefficients of friction are plotted against applied load. Calculated curves by equations (1) and (2) are also depicted on the figures. Rubber specimens were previously abraded by abrasive cloth AA#240 under some loads.

Fig. 5 Relationships between the real contact area and applied load for rubber specimens which were previously abraded by abrasive cloth AA#240 under some loads.

Fig. 6にスリップ比と駆動力および制動力係数との関係を示す。スリップ比が約±0.3の範囲で、急激に転がり滑り時の駆動力係数および制動力係数はそれぞれ増加した。特に約±0.1の範囲において、スリップ比と駆動力および制動力係数との間に比例関係が見られた。これはゴムの初期剛性によるものと考えられる。スリップ比が約-0.3から-1および約0.3から1付近まではスリップ比の絶対値が増加するに従い、駆動力および制動力係数は漸増した。-0.5以下および0.5以上では、カーボン配合SBRにおいて、駆動時ではほぼ一定値をとり、制動時でも若干上昇傾向があるがほぼ一定値を示した。シリカ配合SBRでは、駆動時および制動時ともスリップ比の絶対値の増加により漸増した。3種類の試料で、全滑り ( $s = \pm 1$ ) に近い領域では、駆動力および制動力係数が上昇し、制動時で増加の割合が顕著であった。また、 $s_B = 1$ 、すなわちゴム輪がガラス円板上で完全にロックした場合、制動力係数は他のスリップ比における場合よりも高い数値になった。そ

Table 1 Compound formulation of rubber specimens (phr).

Specimen	SBR-silica	SBR-HAF	SBR-SAF
SBR1502	100	100	100
Silica	50		
Carbon black HAF		50	
Carbon black SAF			50
Si-69	4		
DEG <sup>(1)</sup>	2.7		
ZnO	3		
Stearic acid	1	1	1
Antioxidant <sup>(2)</sup>	1	1	1
Process oil	15	15	15
TBBS <sup>(3)</sup>	1	1	1
DPG <sup>(4)</sup>	0.5		
Sulfur	2	2	2
Total(phr)	180.2	173	173

(1)DEG : Diethylene glycol

(2)Antioxidant : N-Phenyl-N'-(1,3-dimethylbutyl)-p-phenylenediamine

(3)TBBS : N-tert-Buthyl-2-benzothiazyl sulfeneamide

(4)DPG : 1,3-Diphenyl guanidine

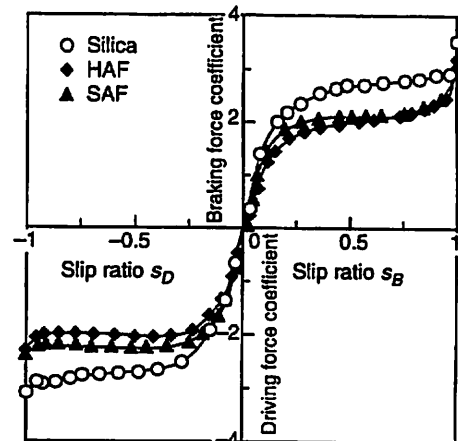


Fig. 6 Relationships between the braking and driving force coefficients and slip ratio.

Table 2 Mechanical properties of rubber specimens.

Specimen	SBR-silica	SBR-HAF	SBR-SAF
$M_{100}$ (MPa)	2.0	2.5	2.3
$M_{300}$ (MPa)	8.4	11.8	9.9
$T_B$ (MPa)	20.1	22.9	25.6
$E_B$ (%)	528	515	583
Hardness JIS(A)	61	61	62
$\tan\delta$	0.187	0.265	0.320
$E'$ (MPa)	6.53	6.87	8.14
$E''$ (MPa)	1.22	1.82	2.60

して、さまざまなスリップ比において、シリカ配合SBRが他2つのカーボンブラック配合SBRよりも制動力係数および駆動力係数は高かった。Table 2よりシリカ配合SBRはカーボンブラック配合SBRより

もヤング率が低く、従って接触面積が大きくなることにより駆動力および制動力係数が大きくなると考えられる。

Fig. 7にシリカ配合ゴムにおける転がり滑り状態 ( $-1 < s < 1$ ) および全滑り状態 ( $s = \pm 1$ ) の駆動力係数および制動力係数とスリップ比の関係を示した。全滑り状態においては滑り速度に拘わらず全速度域で同程度の駆動力係数または制動力係数を示しており、滑り転がりにおける粘着域はほとんど無く、滑り域だけによる摩擦状態であると考えられる。駆動側について考えると、摩擦力は粘着の項、滑りの項、ヒステリシスによる項の合力であるので、ゴム輪の速度が40mm/sで一定であることから、ヒステリシスの項および滑りの項が全滑りの駆動力係数により示されていると考え、 $\mu-s$  曲線と  $\mu-v$  曲線:  $s_D = -1$  との差が粘着により起因すると考えることが出来る。制動時についても、全滑りの場合のヒステリシスの有無という点が異なるが、 $\mu-s$  曲線と  $\mu-v$  曲線:  $s_B = 1$  との差は同様の理由によるものと考えられる。

シリカ配合SBRにおける転がり滑り実験中の接触面について、相手面ガラス円板を通して撮影した静止時、制動時、駆動時の画像を Fig. 8(a), (b), (c)に示す。暗部で示される領域が接触部である。動的な場合はゴム輪の両端の方が中央部よりも接触箇所が減少し、接触面は弓なり形状を示した。これは摩擦力による接触面内の曲げ変形が生じているものと考えられる。

Fig. 9に3種類の試料についてスリップ比と接触面積の関係を示した。すべての試料で静接触の接触面積が最大であり、滑り転がり摩擦においては非常に小さな速度であっても、接触面積が静接触の場合よりも低下した。3種類の試料の中でヤング率をもっとも高いHAFカーボンブラック配合SBRが最小

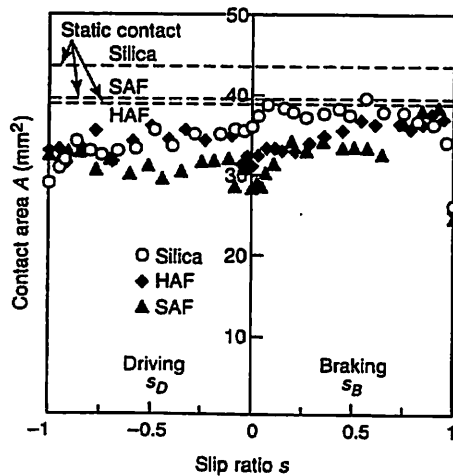


Fig. 9 Relationships between the contact area and slip ratio.

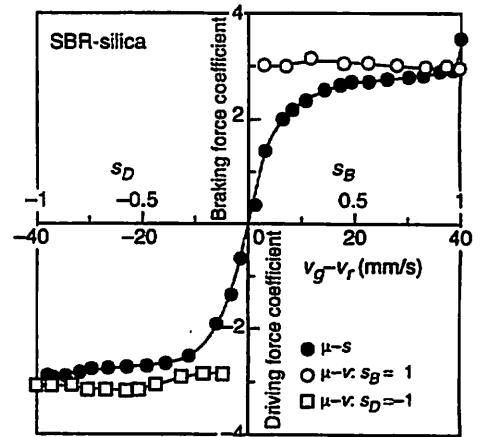
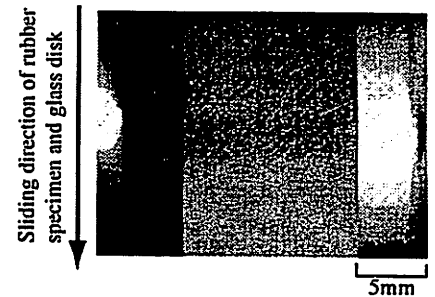
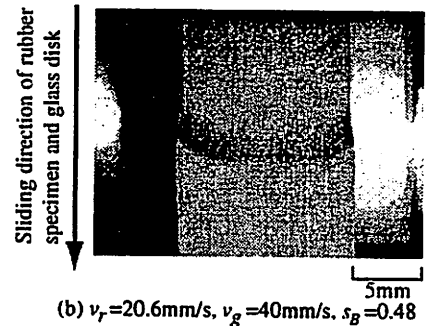


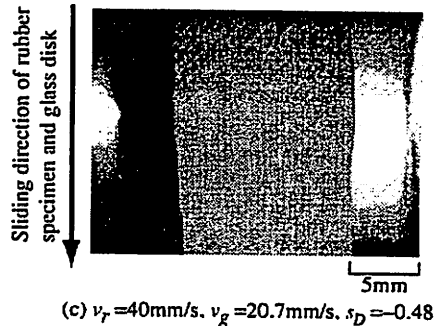
Fig. 7 The relationship between the braking and driving coefficients and slip ratio ( $\mu-s$  curve) for the SBR-silica. The braking and driving coefficients are also plotted against the relative speed of the glass disk and the rubber wheel ( $\mu-v$  curves,  $s_B=1$  or  $s_D=-1$ ).



(a) Static contact



(b)  $v_r=20.6\text{mm/s}$ ,  $v_g=40\text{mm/s}$ ,  $s_B=0.48$



(c)  $v_r=40\text{mm/s}$ ,  $v_g=20.7\text{mm/s}$ ,  $s_D=-0.48$

Fig. 8 Contact areas in the  $\mu-s$  experiment for the SBR-silica.

で、ヤング率が最小なシリカ配合SBRが接触面積が最大となった。制動時、および駆動時のスリップ比が $-0.3$ から $0$ の範囲ではシリカ配合SBRがカーボンブラック配合SBRよりも接触面積が大きかった。ロック状態 ( $s_B = 1$ ) において接触面積は最小となった。 $s_D = -1$ においてシリカ配合SBRはカーボンブラック配合SBRよりも接触面積が小さくなっている。これはシリカ配合SBRの粘弾性特性  $\tan\delta$  がカーボンブラック配合SBRよりも小さく、摩擦力により加えられる変形からの回復が早いためと考えられる。

Fig. 10に固着域と滑り域とを合わせた全接触域で摩擦力を平均化した平均せん断強さ (Effective friction force at unit contact area) とスリップ比との関係を示す。ほぼ全域でシリカ配合SBRがカーボンブラック配合SBRよりも平均せん断強さが大きい。スリップ比が $\pm 0.1$ の範囲では3種類の試料でほとんど差が無くまた、スリップ比に対しほぼ比例状態で制動時および駆動時の差も無かった。それ以外の範囲では試料間で大きな差が見られた。

#### 4. 結言

滑りおよび転がり摩擦と接触面の挙動に関して、アブレーションパターン面の摩擦方向による異方性特性、また、シリカ配合ゴムおよびカーボンブラック配合ゴムについてスリップ比と駆動力および制動力係数、接触面積、せん断強さの関係について調べた。

アブレーションパターン面における摩擦において、研磨布との当り出し方向 (逆方向) に摩擦した方が、その反対方向 (順方向) よりも摩擦係数が高くなることがわかった。当り出し荷重が大きな場合は、ゴム上のパターン間隔も広がるが、そのときには逆方向および順方向の摩擦とも減少する傾向が見られた。逆方向と順方向とも、摩擦中の荷重の増加とともに、摩擦係数は減少する傾向が見られた。当り出し荷重が大きく、パターン間隔が広い程、その減少傾向が大きいことがわかった。

ゴムの転がり滑り摩擦について、シリカ配合ゴムはカーボンブラック配合ゴムよりも高い駆動力および制動力係数を示した。これは弾性係数の違いによるものと考えられる。転がり滑り摩擦における接触面積は、静接触の場合よりも小さい。これは全滑りにおいても同様であった。また、ゴムがロック状態で摩擦される場合の接触面積が最小であった。接触面積の減少については、接触力による接触面内のせん断曲げ変形が低速度域においても観察された。固着域と滑り域とを合わせた全接触域で摩擦力を平均化した平均せん断強さは、ほとんどのスリップ比でシリカ配合SBRがカーボンブラック配合SBRよりも大きかった。スリップ比が $\pm 0.1$ の範囲では試料による差は小さく、また、スリップ比に対しほぼ比例状態で制動時および駆動時の差も小さかった。それを越えた範囲では試料間で大きな差が見られた。

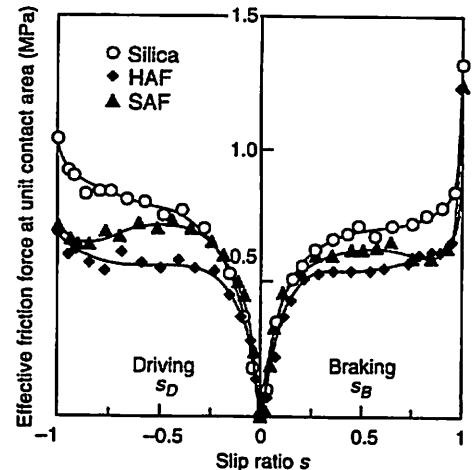


Fig. 10 Relationships between the friction force at the unit contact area and slip ratio.



## 学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成15年7月29日、第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関係資料について詳細に検討した。平成15年8月5日の口頭発表後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り判定した。

本論文では、ゴムの摩擦面で生じ、滑り方向に直角で平行な「のこ歯」状のアブレーションパターン面において、その摩擦係数の異方性について研究を行なっている。相手面をこのアブレーションパターン面の「のこ歯」に引っかかる方向（逆方向）に摩擦したときには摩擦係数が高く、それと反対に「のこ歯」をなぞる方向（順方向）では摩擦係数が低くなる現象について、接触面の直接観察を行なうとともに解析を行なった。そして、摩擦係数の変化をアブレーションパターン面にかかる付加的な荷重の増減にもとづいて説明を行なっている。さらにゴム輪が相手ガラスディスクと転がり滑り摩擦を行なう現象について調べ、スリップ比と駆動力係数および制動力係数の関係を求め、接触面の直接観察を行なった。そして、スリップ比が大きくなるとともに駆動力係数および制動力係数が増大する現象を接触面積の変化と対応させ、この現象を有効せん断強さにもとづき説明している。このように、本論文はゴムの摩擦機構を詳細に解明するとともに、ゴムロール、タイヤの優れた基礎研究をなすものであり、工学的価値は高いと評価できる。

以上より、本論文は博士（工学）論文に値すると判定する。