

ゴムの摩擦の速度特性と摩擦振動および接触変形に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード: 作成者: 陸, 子蒙 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/26650

氏名	陸子豪
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第734号
学位授与の日付	平成17年3月22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	ゴムの摩擦の速度特性と摩擦振動および接触変形に関する研究
論文審査委員(主査)	内山 吉隆(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副査)	山田 良穂(自然科学研究科・教授), 新宅 救徳(自然科学研究科・教授), 梶川 康男(自然科学研究科・教授), 喜成 年泰(自然科学研究科・教授)

学位論文要旨

A series of experiments was performed using a pin-on-disk type tribometer to investigate the $\mu - v$ characteristics of eight rubber specimens and their friction-induced vibrations. It was shown that the vibrations occurred in speed ranges in which the slopes of the $\mu - v$ curves were negative. The pin specimens of NR, SBR, and HNBR showed high negative slopes in the $\mu - v$ curves. At that time, marked friction-induced vibrations were observed. The vibration amplitude obtained by numerical analysis of the mechanical model coincided with the experimental results.

Experiments for carbon black-filled SBR ($T_g = -51^\circ\text{C}, -21^\circ\text{C}, -6^\circ\text{C}$), silica-filled SBR ($T_g = -51^\circ\text{C}, -21^\circ\text{C}, -6^\circ\text{C}$) were conducted under dry and wet conditions. The contact area and the $\mu - v$ curve were investigated experimentally. Rubber friction involves two terms, adhesion and deformation. It was found that peaks appear in the $\mu - v$ curves for all the rubber specimens under dry condition, which result from adhesion term. Both numerical calculations and experimental results showed that the adhesion term plays a significant role on rubber friction. It was shown the deformation of contact area related to loss tangent $\tan \delta$ and storage modulus E' , and contact areas decrease with increasing the sliding speed.

1. 緒論

本研究では、 $\mu - v$ 特性の負の勾配と摩擦振動の発生について着目した。そして、各種ゴムの摩擦係数の速度特性を調べ、摩擦振動の発生する摩擦速度の範囲を明らかにするとともに、摩擦振動発生に及ぼす接触圧力、相手表面のうねりなど外部因子の影響についても調べた。また、 $\mu - v$ 特性と摩擦振動発生時の振幅との関係を理論に基づき数値計算を行い、実験データとほぼ一致することも確かめている。

2. 実験装置および試料

2.1 実験装置および方法

本実験に用いたピン・オン・ディスク摩擦力測定装置を Fig.1 に示す。この装置は駆動ベルトのとりかえにより、定速式および慣性式の二つの方法で摩擦実験を行うことができる。定速式では、ピン試料とディスク板との摩擦係数を一定速度で測定する方法である。慣性式ではディスクを高速度で回転させ、モーターを切ってクラッチをはずし、その後にピン試料とディスク板を摩擦させたとき、ディスク板が停止するまで慣性回転する減速過程でみかけの摩擦係数を測定できる。なお、実験には必要に応じて、それぞれの方式で摩擦係数の測定を行った。

Fig.2 には、この装置の計測システムを示した。摩擦力は平行ばねに貼り付けたひずみゲ

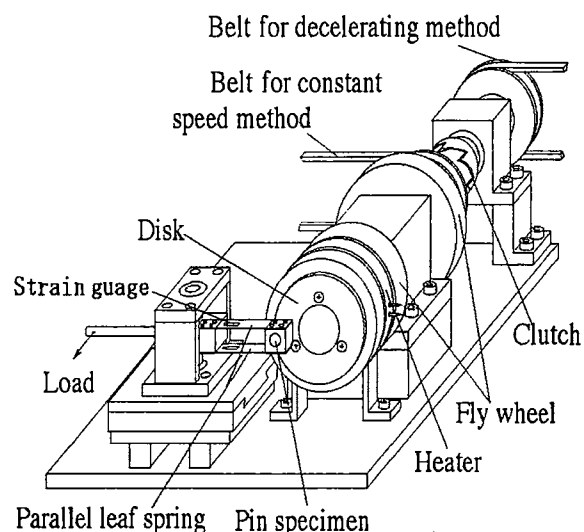


Fig.1 Schematic view of a pin-on-disk type

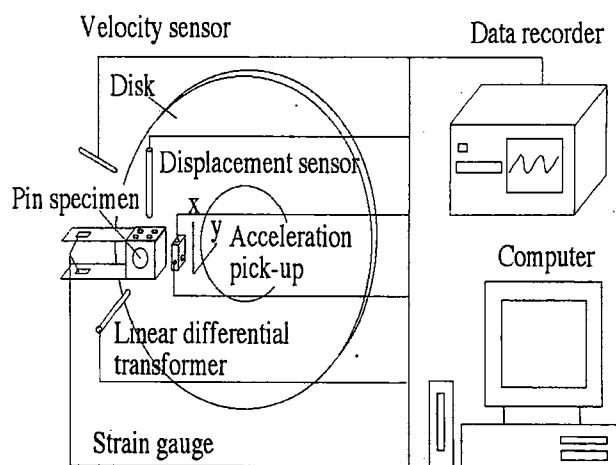


Fig.2 System for vibration measurements.

ジにより、ディスクの回転速度を回転速度センサーにより測定した。ピン試料ホルダーには、加速度ピックアップが取り付けられており、ピンホルダーが振動したときの加速度、速度が求められるようになっている。同時に、レーザー変位計によっても、ピンホルダーの変位が測られる。この平行ばね系の固有周波数は 33Hz であった。摩擦速度を 0.05m/s から 3.96m/s の範囲で摩擦係数を測定し、また、荷重 W を 0.98N, 1.96N, 2.94N の 3 条件について実験を室温 23°C で行った。このときのばね系質量 m は 120g であった。なお、固有振動数や粘性減衰係数は、ピン試料を取り付けた状態で自由減衰法によって測定した。実験で得られた各種信号をデータレコーダーで記録し、パソコンによってデータを整理や周波数の FFT 解析を行った。

2.2 試料

実験のゴムピン試料としては、クロロプレンゴム (CR (B1)と略記する)、ニトリルゴム (NR (B2)と略記する)、水素化ニトリルゴム (HNBR (B3)と略記する)、エチレンプロピレンゴム (EPDM (B4)と略記する)、クロロスルホン化ポリエチレンゴム (CSM (B5)と略記する)、

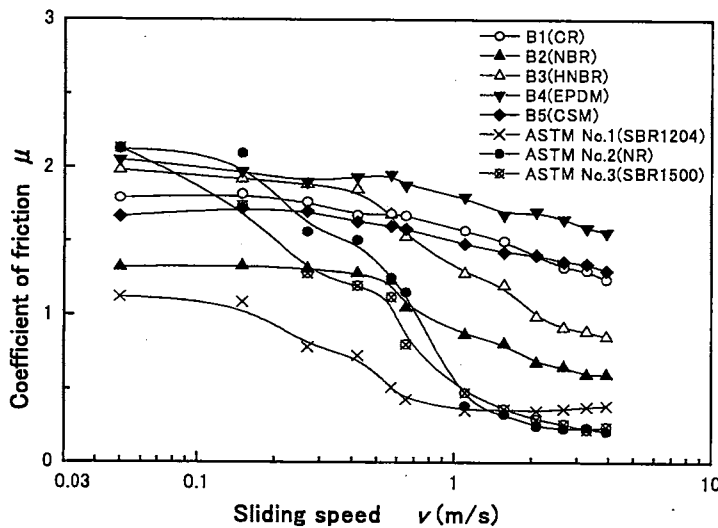


Fig. 3 The $\mu - v$ curves of various pin specimens obtained by the constant speed method under a load of 1.96N.

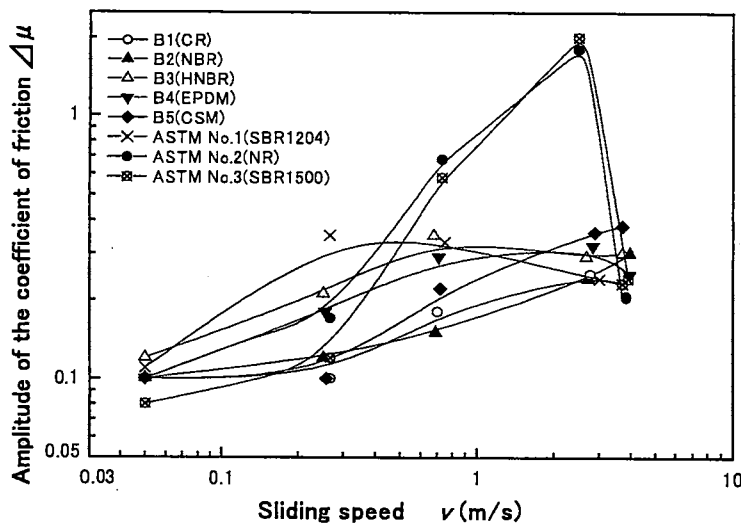


Fig. 4 Amplitude of the coefficient of friction for various pin specimens plotted against sliding speed under a load of 1.96N.

った。Fig.3は、各種ゴムの摩擦係数(変動する場合、その平均値をもって動摩擦係数とした)が摩擦速度の増加とともに変化する様子を示し、また、Fig.4はそのときのばねの変位によって示される見かけの摩擦係数の変動する両振幅(最大と最小の差)を表したものである。Fig.3に示すいずれのゴム試料の定常摩擦係数は、摩擦速度が増加するとともに減少する傾向が見られた。とりわけ、ASTM No.1(SBR1204)、ASTM No.2(NR)、ASTM No.3(SBR1500)、B3(HNBR)の $\mu - v$ 特性が高速度になると大きな負の勾配をもっている。このとき、ASTM No.2(NR)とASTM No.3(SBR1500)では、Fig.4に示すように2.5m/s付近で大きなみかけの摩擦係数の振幅が見られた。Fig.3の $\mu - v$ 曲線を比べると、実験を行ったすべての速度域においてB1(CR)、B4(EPDM)およびB5(CSM)の摩擦係数の高速度での低下は少ない。B3(HNBR)とB2(NBR)はFig.3

スチレンブタジエンゴム(SBR1204 (ASTM D2228の校正用No.1相当試料で、ASTM No.1と略記する))、天然ゴム(NR (ASTM D2228の校正用No.2相当試料で、ASTM No.2と略記する))、スチレンブタジエンゴム(SBR1500 (ASTM D2228の校正用No.3相当試料で、ASTM No.3と略記する))の8種類とした。実験に用いたゴム試料は、4mm×4mmの四角形で厚さ1.5mmに切り出したものを、ピン試料ホルダーに貼り付けた。相手ステンレス鋼ディスク板SUS303の粗さRaは0.02 μm になるように、2 μm のアルミナ砥粒でバフ仕上げし、ディスクホルダーには表面のうねりが20 μm 程度になるように取り付けた。なお、実験前に研磨紙cc#1500を相手ディスク板に取り付けてピン試料の摩擦面の当たり出しを行った。

3. 実験結果および考察

3.1 定速式摩擦試験法による各種ゴムの $\mu - v$ 曲線

荷重1.96Nにおいて、定速式摩擦試験法を用いて、各摩擦速度での各種ゴム試料の定常状態の摩擦係数および摩擦係数の変動を調べる実験を行

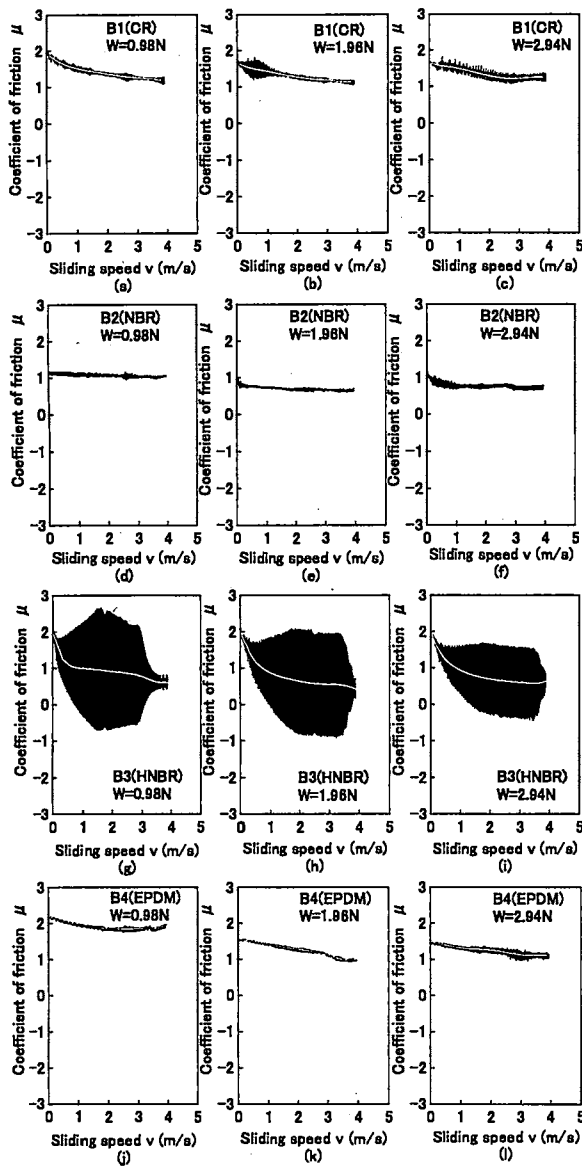


Fig. 5 The coefficients of friction for various pin specimens are plotted against the sliding speed obtained by the decelerating method under various applied loads: (a)~(c) B1(CR); (d)~(f) B2(NBR); (g)~(i) B3(HNBR); (j)~(l) B4(EPDM).

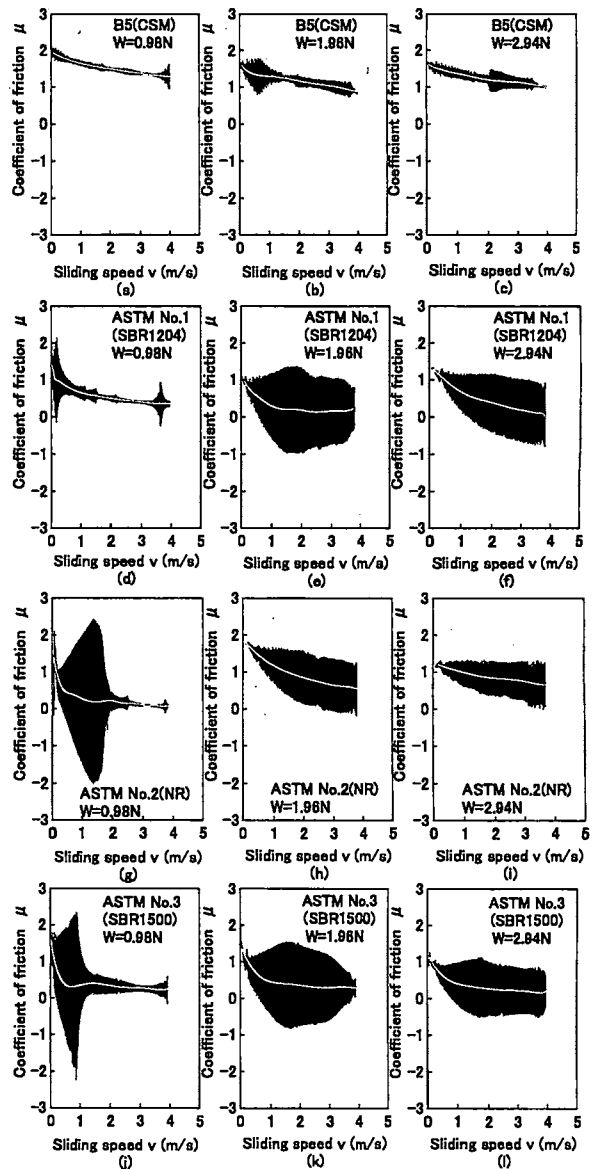


Fig. 6 The coefficients of friction for various pin specimens are plotted against the sliding speed obtained by the decelerating method under various applied load: (a)~(c) B5(CSM); (d)~(f) ASTM No. 1 (SBR1204); (g)~(i) ASTM No. 2 (NR); (j)~(l) ASTM No. 3 (SBR1500).

に示すように、やや大きな負の $\mu - v$ 曲線の勾配が見られたが、いずれのゴムも、Fig.4 に示すように ASTM No.2 と ASTM No.3 に比べてわずかな摩擦係数変動が見られたにすぎない。

3.2 慣性式摩擦試験法による各種ゴムの $\mu - v$ 曲線

0.98N, 1.96N, 2.94N の三つの荷重下において、慣性式の測定方法を用いて、3.96m/s の高速から停止する 0m/s までの、ばねに貼り付けたひずみゲージから測定された見かけの摩擦係数の変化を求めた。これらの摩擦係数と摩擦速度の関係をデータレコーダーに取り込み、パソコンによって $\mu - v$ 曲線を書き直した結果を Fig.5 と Fig.6 に分けて示した。図中の黒くみえる部分はみかけの摩擦係数の変動振幅を示し、白い線はこの変動を平均して得られた $\mu - v$ 曲線を示している。

Fig.5 と Fig.6 からわかるように、B3(HNBR), ASTM No.1(SBR1204), ASTM No.2(NR), ASTM No.3(SBR1500) の四つ試料では、 $\mu - v$ 曲線の比較的大きな負の勾配が見られ、その時には著しい摩擦振動の発生が見られた。Fig.5(g), (h), (i) の B3(HNBR) や、Fig.6(d), (e), (f) の ASTM No.1(SBR1204), Fig.6(g), (h), (i) の ASTM No.2(NR) と Fig.6(j), (k), (l) の ASTM No.3(SBR1500) の結果からわかるように、荷重が 0.98N から 1.96N, 2.94N と増加すると、 $\mu - v$ 曲線の大きな振幅は小さくなり、摩擦振動を起こす速度範囲が高速度まで広がる傾向が見られた。

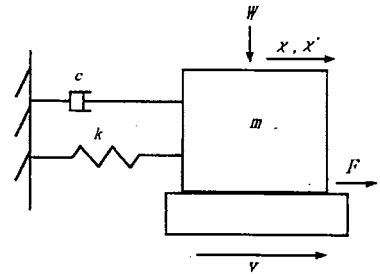


Fig.7 Spring-mass-damper system

3.3 定速式摩擦試験法における $\mu - v$ 特性と振幅の関係

本研究で用いたピン・オン・ディスク実験装置の振動系をモデル的に示すと、Fig.7 による振動系で表わすことができる。このとき、振動の方程式は次式で表わせる。

$$m x'' + c x' + kx = F \quad (1)$$

ここで、 m は質量、 k はばね定数、 c は粘性減衰係数、 F は摩擦力である。

摩擦力 F は、荷重 W とディスクとピンの相対速度の関数である摩擦係数 $\mu(v - x')$ の積であるとする。ここで、 v はディスクの速度、 x' はピンの速度とする。

$$F = \mu(v - x')W \quad (2)$$

摩擦係数の速度特性 $\mu - v$ 曲線は次のように n 次の多項式で近似する。

$$\mu(v - x') = C_n(v - x')^n + C_{n-1}(v - x')^{n-1} + \dots + C_0 \quad (3)$$

(C_0, C_1, \dots, C_n : 定数)

試料の実測した $\mu - v$ 曲線を回帰することによって式(3)の定数 $C_1 \dots C_n$ を決定した。そして、Brockleg¹²⁾ が振幅を求めたと同様の方法で Bogoliuboff-Mitropolsky 漸近法¹³⁾ の第一次近似を用いて振動方程式(1)を解析し振幅の理論値を得た。

ここで、Fig.3 に示した試料 B5 (CSM) の定速式摩擦実験の結果を用い、振動振幅(片振幅)の計算を行った。Fig.8(a) に示す定常摩擦係数 μ と摩擦速度 v の曲線に合うように式(3)の $C_1 \dots C_n$ を決定すると、摩擦係数の速度特性 $\mu - v$ 曲線を次のように表せる。

$$\begin{aligned} \mu = & 0.018 (v - x')^5 - 0.183 (v - x')^4 + 0.67 (v - x')^3 \\ & - 0.977 (v - x')^2 + 0.332 (v - x') + 1.652 \end{aligned} \quad (4)$$

ここでは、5 次の多項式 ($n=5$) を使用し、Fig.8(a) に実線で示した。

そして、振動する振幅(片振幅)の理論計算値(実線)を実験値(プロット点)と比較したのが Fig.8(b) である。計算値では、摩擦係数の勾配 μ' が負になると振幅が急激に増大を示すが、1.70 m/s 以上の速度で、計算不能となった。勾配 μ' と振幅に関しては、従来の報告

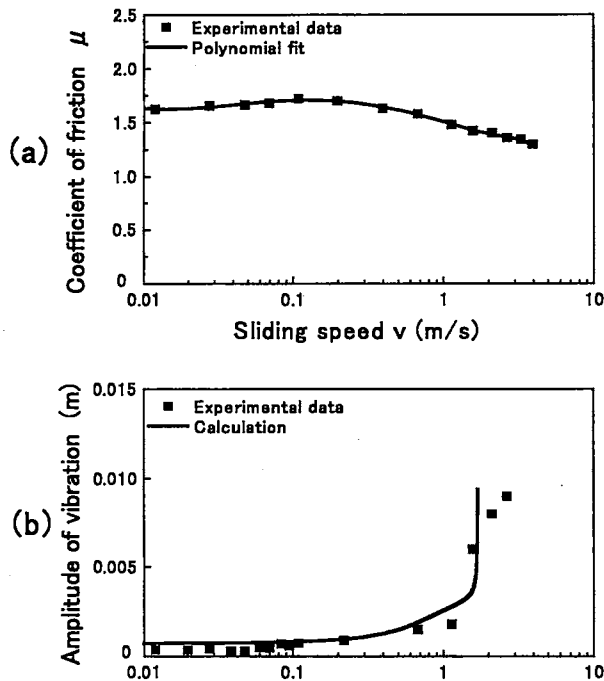


Fig.8 (a)Variation of the coefficient of friction for the specimen B5(CMS) with sliding speed under a load of 1.96N. (b) The amplitudes of vibrations data are plotted against sliding speed. Calculation of the amplitude of vibration—sliding speed curve is also shown.

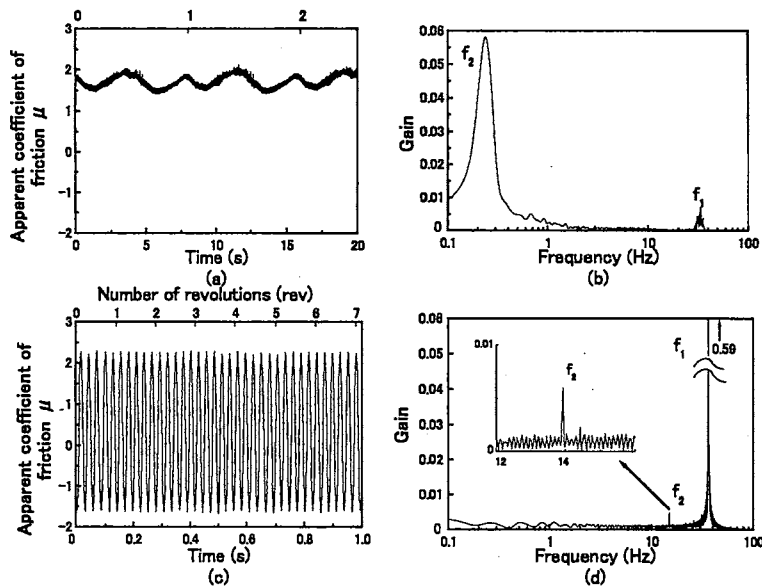


Fig.9 The coefficient of friction versus time and frequency spectrum of vibration for the specimen ASTM No.2 under a load of 1.96N: (a) coefficient of friction at sliding speed of 0.27m/s; (b) frequency spectrum of vibration at sliding speed of 0.27m/s; (c) coefficient of friction at sliding speed of 1.57m/s; (d) frequency spectrum of vibration at sliding speed of 1.57m/s.

と同様の結果が得られた。実験で実測した結果と比較してみると、ある範囲（ほぼ 1.70m/s 未満の速度）で両方の値が一致した。これから、数値計算によっても $\mu - v$ 特性曲線の勾配が負の値になると振動が急激に大きくなることを示すことができた。しかし、1.70m/s 以上になると、計算値の振幅は急上昇するが、実験値は必ずしも一致していない。これは、実際のはね系では振幅の大きさに限界があり、何らかの拘束条件を考慮する必要があるためであると考えられる。

3.4 振動の周波数分析

Fig.9(a)と Fig.9(c)は、試料 ASTM No.2 (NR)の速度0.027m/sと 1.57 m/s の定速の実験で、それぞれひずみゲージから測定したみかけの摩擦係数と時間および回転数の関係を示したものである。Fig.3 に示すように、試料 ASTM No.2 (NR)の $\mu - v$ 曲線は、低速で急な負の勾配をもち、振動が発生することがわかっている。Fig.9 (b)と Fig.9 (d)は、Fig.9 (a)と Fig.9 (c)のそれぞれみかけの摩擦係数の変動を周波数分析した結果を示す。これらの二つ図において 36 Hz (周波数 f_1 と呼ぶことにする)に共振が見られる。この周波数は、ほぼシステムの固有周波数 33 Hz の付近に見られ、自励振動の摩擦振動の共振周波数と考えてよい。Fig.9 (b)の 0.027 m/s では低周波数 0.24 Hz(周波数 f_2 と呼ぶことにする)に大きなピークが現れているが、これは、ディスクの軌道をピン試料が一周するうちに二つのうねりピークが存在するため、ディスクが一回転する間に摩擦力の二回の変動が生じ、それが原因で 0.24Hz (これを f_2 と呼ぶ)にピークが見られた。Fig.9 (d)では、ディスク一回転当たり二つのうねりのピークが見られ、そのため、14Hz (f_2) に小さなピークが見られた。Fig.9 (d)に示す

36Hzの大きなピークは自励振動によるものと思われる。

4. 結論

(1) 求められた各種ゴム試料特有の $\mu-v$ 曲線において、比較的大きな負の勾配を示す ASTM No.1 (SBR1204), ASTM No.2 (NR), ASTM No.3 (SBR1500)および B3 (HNBR)の四種類の試料では摩擦振動が激しく発生した。また B5 (CSM)試料は摩擦振動が見られたが、特定の速度範囲でわずかに発生したにすぎなかった。

(2) 各種ゴム試料の定常摩擦係数の速度特性($\mu-v$ 曲線)の勾配が負のとき大きな摩擦振動が生じ、正のときには摩擦振動が抑制される傾向がみられた。荷重の増加とともに、大きな振幅の摩擦振動が発生する速度範囲が高速度にまで拡大するが、その振幅はやや減少した。

(3) 定速式の摩擦実験から得られた定常摩擦係数の摩擦速度曲線($\mu-v$ 曲線)を利用して摩擦振動の振幅を数値計算した結果、勾配が負になると摩擦振動が発生し、かつ、実験値とある速度以下の範囲では一致することがわかった。

第2編 ゴムの摩擦の速度特性と接触変形に関する研究

1. 緒論

本研究では、ガラス転移温度 T_g の異なる SBR を用いたシリカ配合ゴム試料とカーボンブラック配合ゴム試料について、乾燥面およびぬれ面において、レンズと摩擦するときの速度特性を調べ、摩擦の接触面積を観察し、それぞれの比較を行った。乾燥面とぬれ面で摩擦の変化について検討し、さらにゴムの摩擦メカニズムについて考察した。

2. 実験装置および試料

摩擦接触面の変化を観察するため、第1編に記載されたピン・オン・ディスク摩擦力測定装置に光学観察システムを設置し、改造した。Fig.10 に示すように、上下に設置した二つの光源はゴムシートと平行方向に沿ってレンズへ光を照射する。光がレンズを通し、接触部を照射することにより、接触部の映像はレンズの裏側に設置した光学顕微鏡に取り付けられた CCD カメラにより撮影される。この映像をビデオキャプチャーカードでコンピュータに取り込み、画像処理ソフトを用いて接触面積を求めた。

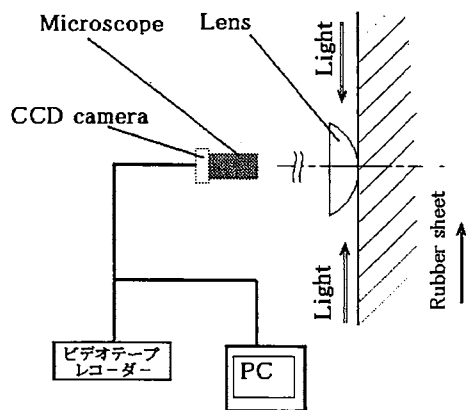


Fig.10 A system for observing contact area.

本実験では、ガラス転移温度 T_g の異なる 3 種類の SBR (スチレンブタジエンゴム) を母材にとし、二つの充てん剤、粒径 16nm のシリカあるいは粒径 26nm のカーボンブラックを配合した 6 種類のトレッド用のゴム試料を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 各種ゴム試料の摩擦係数 μ と摩擦速度 v の関係

乾燥状態および水ぬれ面におけるカーボン配合ゴム試料の摩擦係数 μ と摩擦速度 v の関係を Fig.11 に示した。乾燥状態において、すべてのゴム試料の摩擦係数がそれぞれのピークを示した。つまり、各ゴム試料の摩擦係数は、摩擦速度に対して一つのピークを示す傾向があり、かつ、そのピークがゴム試料 T_g の増加とともに、低い速度へ移動した。材料による差について、同一 T_g に対してシリカ配合ゴムとカーボン配合ゴムの比較をすると、シリカ配合ゴムの方が、摩擦係数が高い傾向が見られた。

水ぬれ面において、いずれの試料について、摩擦係数は摩擦速度の増加とともに減少した。試料間で比較すると、摩擦係数の差も小さかった。

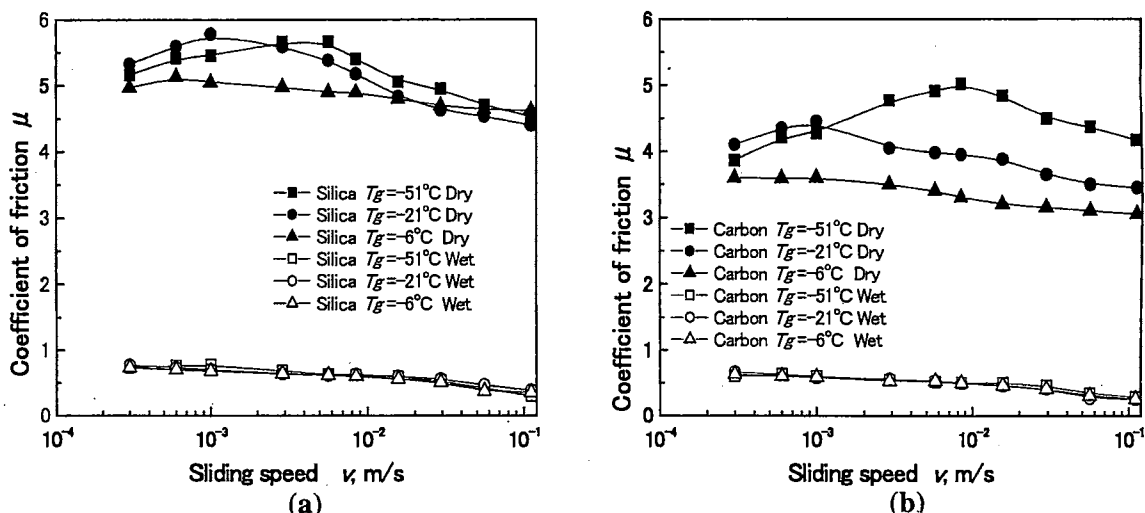


Fig.11 Relationships between the coefficient of friction and sliding speed: (a) Silica-filled rubber; (b) Carbon black-filled rubber.

3.2 接触面積 A と摩擦速度 v の関係

Fig.12 に示すように、静止時では接触面積は大きな円形である。すべりの過程において、摩擦速度の増加とともに接触円の半径が小さくなり、また接触円の後部(レンズ摩擦方向の後部)に欠ける部分があることがわかった。これはゴムが粘弾性体であるためと考えられる。接触円における半径の減少と後半部の欠けは貯蔵弾性率の周波数依存性やクリープ特性の時間依存性などゴムの粘弾性的性質に支配されるものと考えられる。

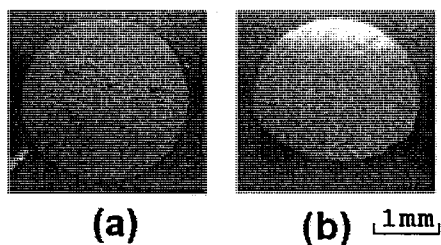


Fig.12 Contact areas: (a) static; (b) 0.0085 m/s

摩擦速度の増加とともに接触円の半径が小さくなり、また接触円の後部に欠ける部分があるために接触面積は減少することがわかった。

3.3 せん断強さと摩擦速度の関係

ゴムの摩擦において、凝着の摩擦力は F_{adh} で、これはレンズとの緊密な接触部に形成された結合力をせん断するに要する力である。これはつぎのように表される。

$$F_{adh} = As \quad (5)$$

A は接触部の面積で、 s は単位面積あたりせん断力である。

3種類のカーボン配合SBRゴムおよび3種類のシリカ配合SBRゴムについて、Fig.14に接触部のせん断強さ s と摩擦速度 v との関係をそれぞれ示す。ここでのせん断強さは実験で測定した摩擦力を接触面積で除したものである。従って、変形に伴う摩擦を無視して、摩擦力のほとんどが凝着の項とみなしたときの値である。

乾燥状態において、せん断強さは低速度で摩擦速度の増加とともにやや大きくなり、ある

速度の以後ほぼ一定の値を示した。乾燥状態におけるせん断強さの比較では、シリカ配合ゴムのほうがカーボン配合ゴムよりも約50%程度高い。

一方、水ぬれ面において、せん断強さは非常に小さくて、摩擦速度の増加によりやや減少した。また、シリカ配合SBRの方がカーボン配合のものよりせん断強さがわずかに高くみられたにすぎない。

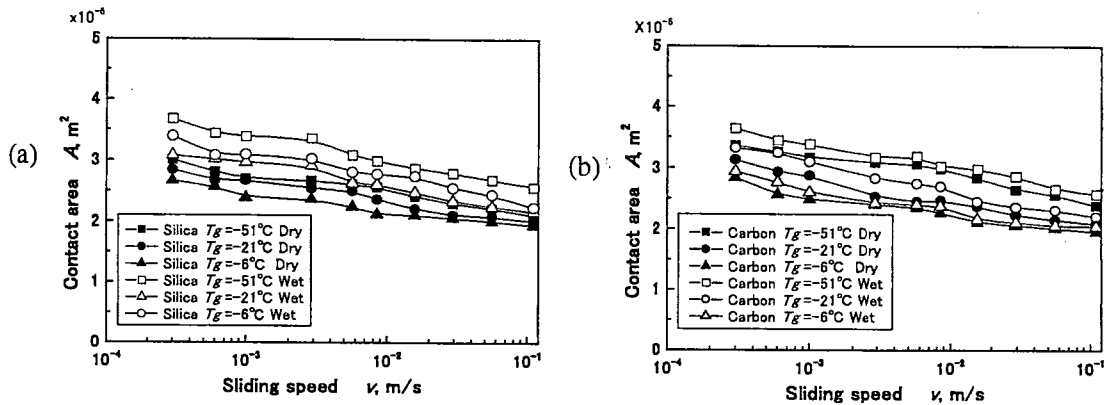


Fig.13 Relationships between the contact area and sliding speed: (a) Silica-filled rubber; (b) Carbon black-filled rubber

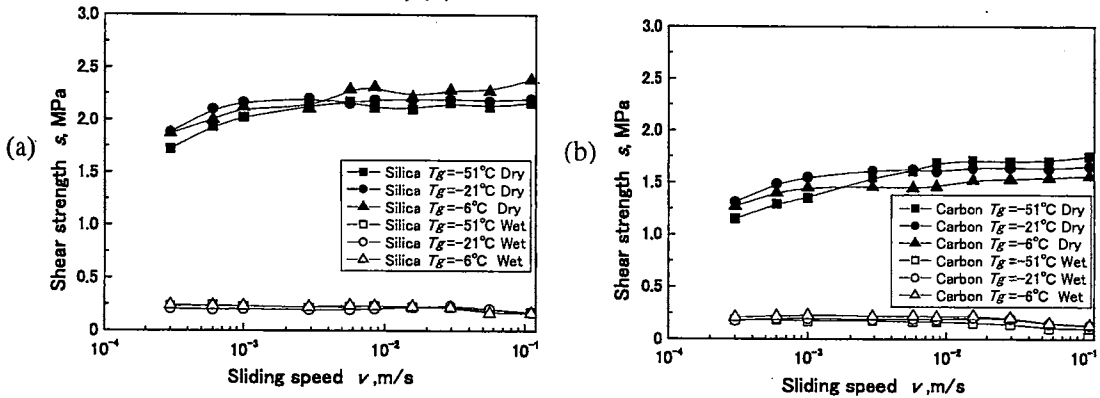


Fig.14 Variations of shear strength of rubber specimens with sliding speed: (a) Silica-filled rubber; (b) Carbon black-filled rubber

3.4 ぬれ面の表面変形と $\tan \delta$ の関係

ぬれ面で、凝着力を水のためとり除かれ、すなわちゴム表面にせん断力が働かず、水平方向の変位を起こさないと仮定した。接触後半部の長さ b と接触円の半径 r の比で接触円変形の程度を表示する β は、完全に凝着をとり除くときに(ぬれ面では) $1 / (1 + \tan \delta / \pi)$ となることがわかる。

Fig.15 に示した接触部における点 $P(x, y, z)$ の垂直な応力 σ_z および水平な応力 σ_x は下式で表わせる。

$$\sigma_z = -\frac{1}{2R^2L} [Ex^2 - 2\eta vx - E(r^2 - y^2)] \quad (6)$$

レンズがゴムと摩擦するにあたって、接触部の前部 A_1 においてゴムがレンズの滑りを妨げるが、後部 A_2 でレンズがゴムに滑り方向へ押される。従って、ヒステリシスによる摩擦力は水平応力の合計を計算することができる。そして、摩擦係数 μ は次式になる。

Sliding direction of lens \rightarrow

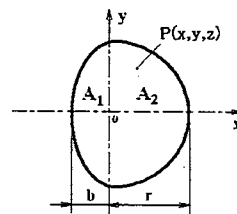


Fig.15 The deformation of contact area

$$\begin{aligned}\mu &= F/W = \frac{1}{W} \iint \sigma_x dS = \frac{1}{W} \iint_z^x \sigma_z dS \\ &= \frac{1}{W} \iint_z^x \sigma_z dA_1 + \frac{1}{W} \iint_z^x \sigma_z dA_2\end{aligned}\quad (7)$$

ここで、積分面 S はレンズがゴムと接触する曲面である。

Fig.16 にはその計算値を示した。摩擦係数が相対的に小さい値を示した。すべてのゴム試料において、摩擦速度の増加とともに摩擦係数が大きくなる傾向がみられた。同じ T_g の試料の摩擦係数を比べると、 $T_g = -6^\circ\text{C}$ と -21°C の試料において全速度域でシリカ配合ゴムはカーボン配合ゴムよりも大きい。また、 T_g が -51°C の場合に低速でカーボン配合ゴムのほうが大きいことがわかった。

また、ゴム試料の貯蔵弾性率 E' と損失正接 $\tan \delta$ の周波数依存性を、計算の結果と関連づけて考慮する。ヒステリシスの摩擦係数は、貯蔵弾性率 E' の増加とともに減少し、または、損失正接 $\tan \delta$ が増大すると大きくなることがわかった。

3.5 乾燥面における摩擦の計算

摩擦力 F は次式で示される。

$$F = As + K \frac{W}{AE'} \tan \delta \quad (8)$$

式 (21) を変形して、下式が得られる。

$$\frac{F}{A} = s + K \frac{W}{A^2 E'} \tan \delta \quad (9)$$

s が一定であれば、 F/A と $W \tan \delta / (A^2 E')$ は、比例関係にある。本研究に用いられたゴム試料について、引張強さの伸長速度依存性は、高速度側で一定値となっており、または s は 1mm/s 以上の高速度区側ではほぼ一定値となった。実験データにより、 F/A と $W \tan \delta / (A^2 E')$ を求め、さらに、その線形関係を表示する実験式の定数 K を決定した。それらの定数 K を式 (8) に導入し、ヒステリシスの項 F_H が得られる。実験値を用いて、乾燥面における摩擦係数 μ からヒステリシスの項 μ_H を分離して求めることができた。また、乾燥面の摩擦係数からそのヒステリシスの項を差し引くことによって、凝着の項 μ_A を求められる。それぞれの試料について μ_A および項 μ_H を計算し、Fig.17 に示した。

Fig.17 に見られるように、摩擦係数において、ヒステリシスの項が凝着の項と比べて、無視してよいほど極めて小さいことがわかった。すなわち、摩擦係数は主に、凝着の項に支配されるといえる。

シリカ配合ゴムまたはカーボン配合ゴム試料の凝着の項 μ_A は摩擦速度の増加により、一つのピークをもち、そのピークは T_g の低い試料ほど高速度側に現れている。Fig.11 に示された摩擦速度特性の曲線にあるピークと対照すると、両者が同一のもので、ほぼ凝着の項のみによるものであると考えられた。ピークを示す原因についていくつかのモデルが提案されている。ここでは、速度の増加によって増加するせん断強さ s と速度の増加に伴う弾性率 E の増加によって減少する接触面積 A の二つに異なった傾向の 2 要因の積 As によって摩擦が決まるためであると考えている。

一方、ヒステリシスの項が摩擦速度の増加とともにやや増加する傾向が見られた。

試料間の違いを比較することによって、凝着の項についてシリカ配合ゴム試料のほうが高く、またはヒステリシスの項について高速度側でシリカ配合ゴム試料が高いことがわかった。そのことより、シリカ配合ゴムはカーボン配合ゴムよりもタイヤトレッドゴムとしてのトライボロジー特性が向上するものと考えられる。

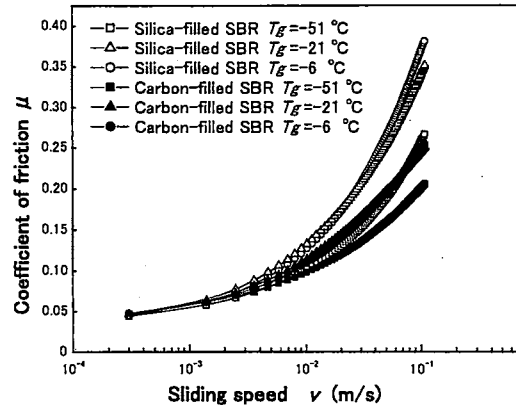


Fig.16 Relationships between calculated μ_{wet} and sliding speed.

実験結果から、ぬれ面におけるゴムの摩擦力は、摩擦面におけるそれらの潤滑膜によって摩擦の凝着の項が大きく低下することによって乾燥状態での摩擦係数よりも相当低下することがわかった。計算により、理想的な潤滑ぬれ面で、摩擦係数が速度の増加に伴う粘弾性特性の変化によって増加する傾向がわかった。しかし、実際に摩擦後の表面観察または摩擦係数の比較によって、凝着の項を完全に取り除くことができず、混合潤滑状態になっているものと思われる。そのとき、残りの凝着の項がぬれ面における摩擦に大きな影響を及ぼし、その影響が潤滑剤の性能の良さにより左右されることがわかった。また、ぬれ面における計算により、同じ T_g をもつ試料において、摩擦係数はシリカ配合ゴムの方が大きいことがわかった。

4. 結論

ガラス転移温度 T_g の異なる 3 種類の SBR を母材とし、二種類の充てん剤シリカあるいはカーボンブラックを配合した 6 種類のタイヤ用トレッドゴム試料を用いて、光学観察システムを設置したピン・オン・ディスク摩擦力測定装置で摩擦実験を行った。各種ゴム試料の摩擦係数と摩擦速度の関係を示す曲線 ($\mu - v$ 曲線) を求め、また、摩擦過程における接触部の変形について調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 摩擦力においては、ヒステリシスの項が凝着の項と比べて極めて小さく、凝着の項が主に支配することが実験と理論計算からわかった。また、接触面積は、摩擦速度の増加とともに低下した。
- (2) シリカ配合ゴムまたはカーボン配合ゴム試料の摩擦係数は摩擦速度の増加により、一つのピークをもち、そのピークは T_g の低い試料ほど高速度側に現れている。このピークは凝着の項によるものと考えられる。また、ヒステリシスの項は相対的に小さいが、摩擦速度の増加とともに増加することがわかった。
- (3) 接触部後半部の長さ b と接触円の半径 r の比 b/r は、接触円変形の程度を表示し、完全に凝着をとり除くときに $1 / (1 + \tan \delta / \pi)$ に比例することがわかった。ぬれ面の混合潤滑状態によって凝着域の存在が接触変形に大きな影響を与えることがわかった。
- (4) 同一 T_g に対してシリカ配合ゴムとカーボン配合ゴムを比較すると、シリカ配合ゴムの方が、摩擦係数が高い傾向がみられた。そのことは、ヒステリシスの項または凝着の項においてもシリカ配合ゴムの方が高いためである。

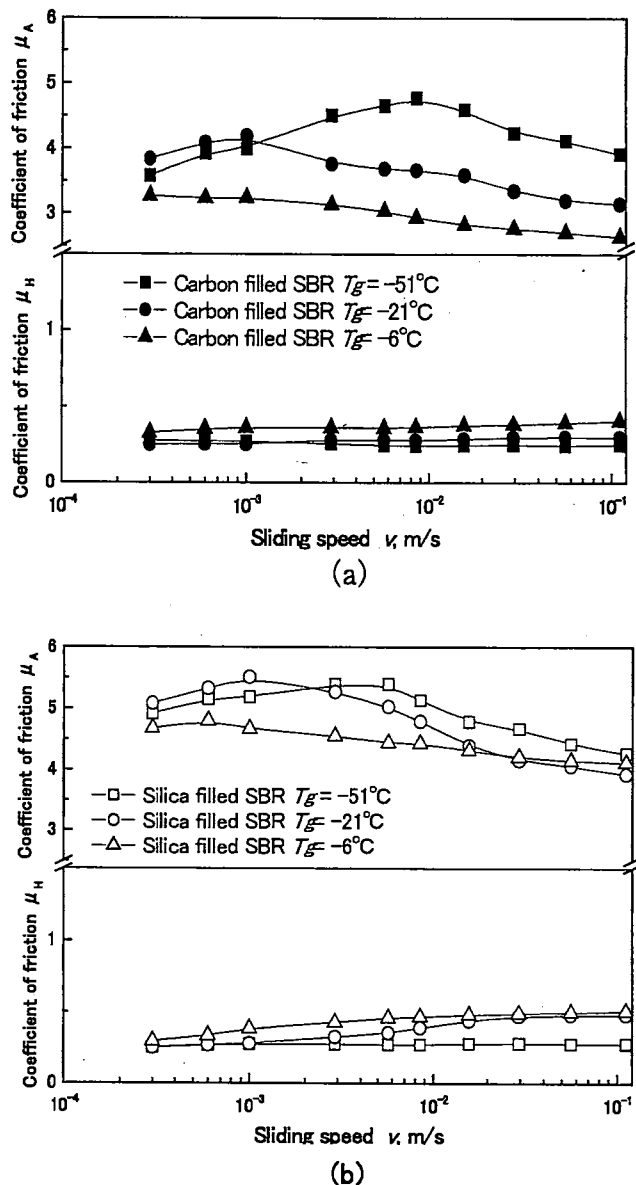


Fig.17 The $\mu - v$ characteristics under dry condition : (a) carbon filled rubber; (b) silica filled rubber.

学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成 17 年 1 月 25 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 17 年 2 月 2 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。

本論文は、第一編「ゴムの摩擦の速度特性と摩擦振動に関する研究」および第二編「ゴムの摩擦の速度特性と接触変形に関する研究」からなっている。第一編では各種ゴムの摩擦係数 μ と摩擦速度 v の関係を調べ、この μ - v 特性が負の勾配を示す天然ゴム、スチレンブタジエンゴム、水素化ニトリルゴムなどで摩擦振動が発生することを明らかにした。また、吸水によって μ - v 特性が負の勾配となり、摩擦振動が発生する現象について解析を行っている。第二編では、ゴム平板とガラスレンズとの摩擦を行い、レンズを通し接触面の直接観察を行っている。そして摩擦係数は接触界面における凝着の項とゴムの変形に伴うヒステリシスの項の和からなり、それらの二つの項の速度変化をもとに μ - v 特性の変化を説明している。このように、本論文はゴムの摩擦機構を解明するとともに、摩擦振動発生の原因を明らかにしており、工学的価値は高いと評価できる。

以上により、本論文は博士（工学）論文に値すると判定する。