

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：32644

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889051

研究課題名(和文)ウェブハンドリング技術の高度化を目的とした基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental Study for Purpose of Advancement of Web Handling Technology

研究代表者

砂見 雄太 (Sunami, Yuta)

東海大学・工学部・助教

研究者番号：10709702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、ウェブハンドリング技術の一層の高度化を図ることを目的としている。そこで本研究では、実験装置を恒温恒湿度下に設置し、静電気、フィルムの膜厚さ、張力、湿度、ローラの表面粗さがフィルムと鋼ローラ間の摩擦特性に及ぼす影響について実験的に検討した。その結果、本研究で行った実験の範囲では静電気と摩擦係数に相関は見られなかった。一方で、湿度の上昇に伴い静摩擦係数は上昇し、メニスカス力の増加と同様の傾向を示した。また、ローラの表面粗さが小さいほど高い静摩擦係数を示し、その傾向は低張力時に著しく現れることがわかった。さらに、膜厚さの変化に伴い静・動摩擦係数が変化することを実験的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop web handling technology. In this subject, friction force between a thin plastic film and steel roller was carried out while changing film thickness, film tension, humidity, roller surface roughness. In addition, the effect of electrostatic force on friction characteristics was investigated. As a result, there is no correlation between electrostatic force and friction force. It was found that both the decrease in the film thickness and increase in relative humidity of the air have an effect of an increase in the static friction coefficient in the system. Moreover, the tendency can be pronounced with the decrease in the web tension and roller surface roughness.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー ウェブハンドリング 静摩擦力 静電気 プラスチックフィルム 湿度 表面粗さ

1. 研究開始当初の背景

プラスチックフィルムのような薄く柔軟な媒体はウェブと称され、ウェブ素材はフレキシブルディスプレイ、電気自動車用電池、太陽光発電、医療用各種フィルムなど多方面への応用・展開が図られている。近年、これらの製品を印刷技術によって製造するプリンテッド・エレクトロニクス技術（以後PE技術）に関する研究が盛んに行われている。一方で、ウェブをその性能を損なうことなく搬送する技術をウェブハンドリング技術（ロール・ツー・ロールとも言う）といい、従来主として経験を基に進められてきたウェブハンドリング技術に対しても学術的な取り組みがなされ始めてきている。さらに昨今、上記製品の製造コストの低減を目的として、ウェブハンドリング技術とPE技術を融合したロール・ツー・ロール・PE技術（図1参照）の開発が進められており、近い将来数十兆円の巨大な市場が生まれることが期待されている。

上にも述べたように、ロール・ツー・ロール・PE技術は将来的に有望な技術であるが、その確立に際してはウェブハンドリング技術の一層の高度化が必要となる。例えば、インクジェットなどは高精度印刷が可能であるが、基盤であるフィルムの搬送精度の低下（蛇行運動など）やフィルムに生じるわずかなしわ（マイクロトラフ）やスリップなどが発生すると印刷が極めて困難になるといった問題がある。このような不具合が生じた場合、高機能フィルムはローラを介して製造されるため不具合がフィルム全体に伝搬してしまい高機能製品としての価値を失うとともに多大な経済的損失を生むことになる。このような不具合はフィルムと鋼ローラ間の摩擦状態に起因している。

このような背景の下、本研究課題ではウェブハンドリング技術の一層の高度化を図ることを目指す。

2. 研究の目的

ロール・ツー・ロール・PE技術の確立には高精度印刷が要求されるため従来よりも極めて高いフィルムの搬送精度が求められる。そこで本研究課題では、ウェブハンドリング技術と深く関係のあるプラスチックフィルムと鋼ローラ間の摩擦特性について実

験的に検討した。具体的には、プラスチックフィルムと鋼ローラ間の摩擦特性に及ぼす静電気、湿度、フィルムの厚さ、ローラの表面粗さの影響について検討したので報告する。

3. 研究の方法

(1) 静摩擦実験

本実験では、フィルム搬送方向におけるフィルムと鋼ローラ間の静摩擦力を測定するために、薄い帯状の物体と円筒面間の摩擦を考える際に多く用いられるプーリ法を使用した。図2に、その実験機構を示す。なお、実験に用いる表面粗さの異なる3本のローラおよびフィルムは、いずれも実際の生産現場で多く用いられる鋼材ローラ（半径40[mm]×幅500[mm]、材質SCM-440）と、PET製のフィルム（ $t_w = 6, 12, 25 [\mu\text{m}]$ ）を使用した。表1に各表面の諸元を示す。

実験では、まず静止した試験ローラ上に幅20[mm]、長さ300[mm]に切り出した試験片を乗せ、試験片の片側におもり（以後入力側と称す）を、もう一方の端に同荷重の水を入れたカップ（以後出力側と称す）を取り付ける。その後、出力側のカップ内に滴下装置を用いて連続的に水滴を加えることで荷重を増加させ、入力と出力の荷重差を大きくしていく。滴下を続けると入出力の荷重差が試験片と試験ローラ間の臨界静摩擦力を超え、試験片がローラ上から滑り始める。その際の両端の張力をそれぞれオイラーのベルト公式(1)に代入し、フィルムと鋼ローラ間の静摩擦係数 μ_s を算出する。

$$\mu_s = \frac{1}{\theta} \ln \left(\frac{T_{\text{exit}}}{T_{\text{inlet}}} \right) \quad (1)$$

ここで、 θ はフィルムの巻き角を表しており本実験では $\theta = 180 [\text{deg.}]$ に設定し、入力側の張力は $T_{\text{inlet}} = 6, 12, 25 [\text{N/m}]$ の範囲で設定した。また、チャンバー内の湿度は、静電気の発生が促進および抑制される相対湿度40~80 [%]の範囲において、5 [%]毎に変化させた。さらに、静摩擦実験後に表面電位計を用いてフィルム表面に帯電する電位を測定した。

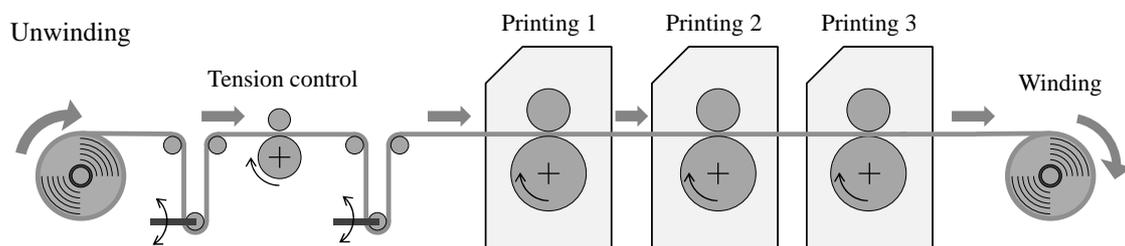


Fig. 1 Schematic diagram of Roll-to-Roll Printed Electronics

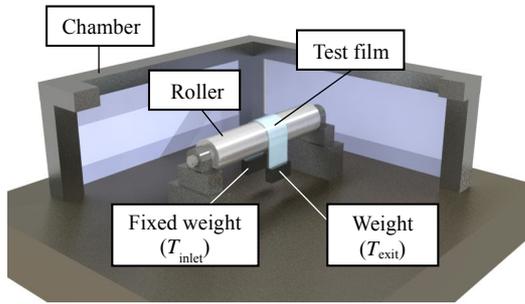


Fig. 2 Experimental apparatus

Table 1 Surface roughness of test roller and test film

	Roller A	Roller B	Roller C	Film
R_a [nm]	284	182	89	25
R_v [nm]	4830	1950	1210	300
R_c [nm]	3218	1434	890	238
R_q [nm]	379	204	116	32

(2) 動摩擦実験

図3に動摩擦試験機の概略図を示す。本試験機はフィルムの片端を固定し、鋼ローラをモータによって回転させることで相対速度を生じさせ、動摩擦状態を作り出す仕組みとなっている。また本実験には、静摩擦実験と同様にPETフィルムを用いた。表2にその物性値を示す。なお、実験時にはフィルムの片端に張力を測定するためのロードセルを取り付け、他端には張力を付与するためのおもりを取り付ける。その後ローラを回転させることで発生する張力をロードセルで検出し、以下に示すオイラーのベルト公式に代入することで、動摩擦係数を算出した。

$$\mu_k = \frac{1}{\theta} \ln \left(\frac{T + \Delta T}{T} \right) \quad (2)$$

ここで、 μ_k は動摩擦係数、 θ は巻き角[deg.]、

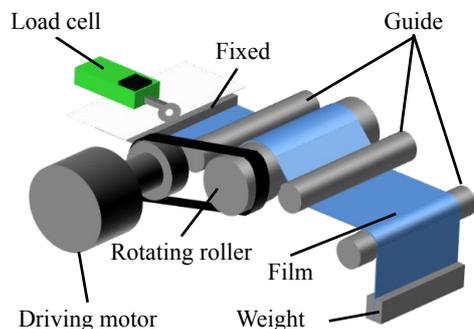


Fig. 3 Experimental apparatus

Table 2 Film parameters

Parameters		Values		
Width	W [mm]	30		
Thickness	t_w [μm]	6	12	50
R.M.S roughness	σ_r [nm]	42	41	52

T は初期張力[N/m]、 ΔT は張力の変化量を示している。なお、本実験では、実験時の巻き角を60[deg.]、設定張力を40, 80, 120[N/m]とし、ローラ周速度を0.15~2.0[m/s]の範囲で実験を行った。

4. 研究成果

(1) 静摩擦実験

静電気とフィルムの膜厚さが静摩擦力に及ぼす影響

図4は、異なる膜厚さのフィルムを用いた際の表面電位に対するフィルムと鋼ローラ間の静摩擦係数を示している。同図の横軸はフィルムに帯電した表面電位を、縦軸は静摩擦係数を示している。また入力側張力 T_{inlet} は12[N/m]、温度および湿度は24.9~26.4[°C]、40.1~45.2[%]の範囲に設定し、表面粗さ379[nm]のローラを使用した。同結果より、本実験でフィルム表面に帯電した表面電位-1.5~0[kV]の範囲では、同じ膜厚さのフィルムを用いた場合には、表面電位の変化に対して静摩擦係数はほぼ一定の傾向を示している。また、同結果を各膜厚さにおいて相関分析を行った結果、いずれの膜厚さにおいても表面電位と静摩擦係数の相関係数は0.5以下を示し、静電気と摩擦係数に相関は見られなかった。一方、図5に示すように膜厚さ毎に見てみると膜厚さが薄くなるにつれて、静摩擦係数が上昇している。この要因として、フィルムの曲げ剛性の低下が考えられる。式(3)に示すように、フィルムの曲げ剛性は膜厚さの

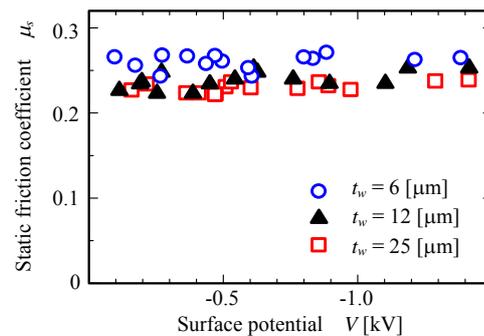


Fig. 4 Relationship between static friction coefficient and surface potential

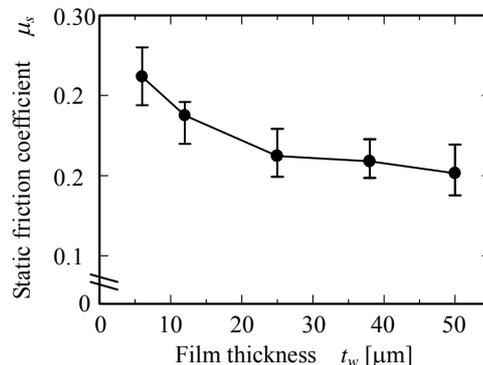


Fig. 5 Relationship between static friction coefficient and film thickness ($T_{inlet}=12$ N/m, $T=24.9\sim 26.4^{\circ}\text{C}$, $H=40.1\sim 45.2\%$)

3乗に比例するため、膜厚さの減少に伴い曲げ剛性は著しく低下する。

$$EI = \frac{t_w^3 WE_{MD}}{12} \quad [\text{Nm}^2] \quad (3)$$

図6にフィルムと鋼ローラの接触概念図を示す。同図に示すように、弾性体であるプラスチックフィルムが高い剛性を有するローラに接触する際、フィルムがローラ表面の粗さ突起に対して追従するように変形すると考えると、フィルムが薄膜であるほどローラ表面の粗さの深くまで追従し、接着剤の原理としても知られるアンカー効果が働く。このとき、フィルムの出力側の張力を増加させると、フィルムがローラの粗さ突起を乗り越えるように働き、追従部には大きな抵抗力が働く。その結果、摩擦係数が増加したと考えられる。このように、プラスチックフィルムと鋼ローラ間のトライボロジー特性には、ローラの粗さ突起に対する薄膜フィルムの変形による追従が影響を及ぼしていると考えられる。

湿度とローラの表面粗さが静摩擦力に及ぼす影響

図7は、表面粗さが異なる3本のローラを用いた際の湿度変化に伴う静摩擦係数の推移を示す。同図(a)~(c)は張力 $T_{inlet} = 6, 12, 25$ [N/m]に設定した際の結果を示し、グラフの横軸は実験槽内の相対湿度を縦軸は静摩擦係数を示している。また、各色のプロットはそれぞれ表面粗さ116, 204, 379 [nm]のローラを用いた際の摩擦実験結果を示しており、プロットは10回測定の実験結果の平均値を、エラー

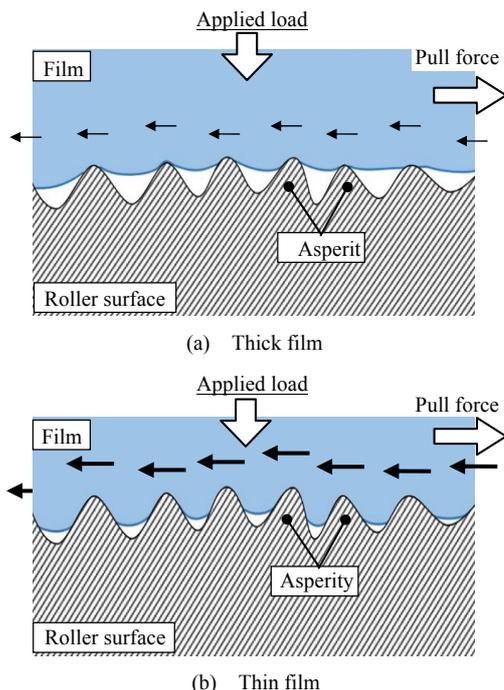


Fig. 6 Schematic diagrams between film and roller surface asperities

バーはそのばらつきを示している。なお実験には、因子の影響が顕著に現れる膜厚さ6 [μm]のフィルムを用いている。同図(a)~(c)より、表面粗さが小さいローラを用いた際に高い静摩擦係数を示し、その傾向は低張力かつ高湿度時に顕著に現れていることがわかる。この要因として、(i)湿度上昇に伴うメニスカスの発生、(ii)低張力時に生じるたわみ効果(Sagging effect)、(iii)表面粗さの小さいローラを用いた際にフィルムとローラ間のすき間が狭くなる、この3因子がローラの粗さ突起に対するフィルムの変形を助長し、トライボロジー特性に影響を及ぼしていると考えられる。また、分散分析により各因子が静摩擦係数に及ぼす寄与率をそれぞれ求めた結果、相対湿度が23.8 [%]、張力が32.6 [%]、表面粗さが36.1 [%]と、3因

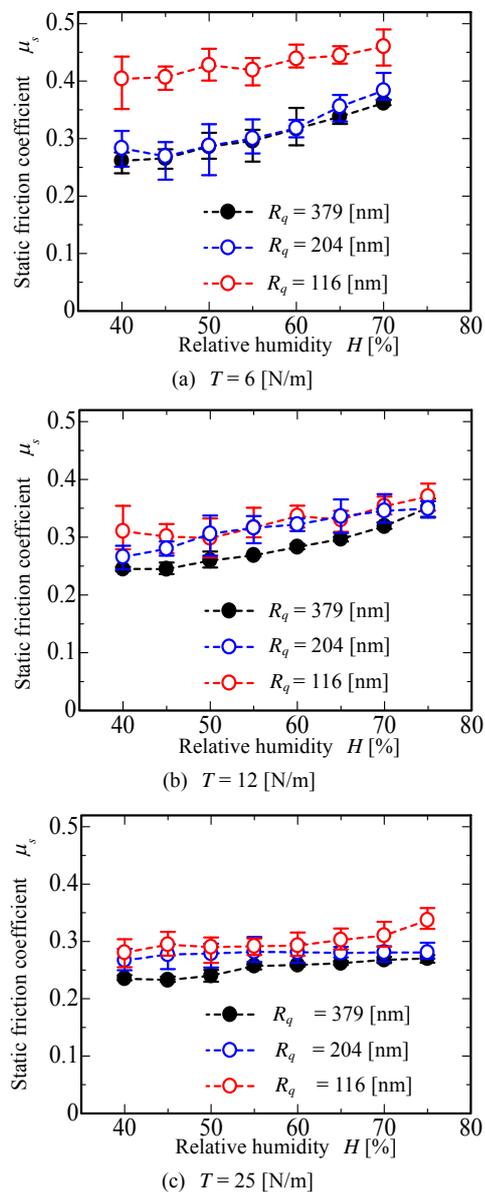


Fig. 7 Variation of static friction coefficient with relative humidity as a parameter of roller surface roughness

子とも非常に高い寄与率を示すことが統計的にも明らかになった。

湿度の上昇に伴い静摩擦係数が上昇する要因として、フィルムとローラ間に形成されるメニスカスによる凝着の影響が考えられる。このメニスカス力 F_m を式(4)に示すヤングの方程式を用いて算出するため、フィルムおよびローラの液滴との接触角を測定した。

$$F_m = 2\pi r_m \gamma (\theta_{roller} + \theta_{film}) \quad [N] \quad (4)$$

このとき、 r_m はメニスカスの曲率半径を、 γ は純水の表面張力を示している。接触角の測定は、滴下した液滴の縁の表面に引いた接線と対象物の成す角度を接触角とし、マイクロSCOPEを用いて撮影を行った。10回測定の平均値は、 $\theta_{film} = 57.6$ [deg.]、 $\theta_{roller} = 71.6$ [deg.]であり、同結果を用いてメニスカス力を算出した。

図8に、湿度変化に伴うメニスカス力の推移を示す。同図より、湿度の上昇に伴いメニスカス力が増加し、摩擦係数の上昇と同様の傾向が現れる。これは、メニスカスによる凝着力によりフィルムの変形が助長されるためと考えられる。一方で、低張力時において高い静摩擦係数を示す要因としては、フィルムのたわみ効果の影響が考えられる。弾性体であるフィルムが高張力時には引っ張られることでローラの粗さ突起に変形しづらくなるのに対して、低張力時にはローラの粗さ形状にたわむように変形し、突起の大部分を覆うように粗さの深くまで追従したことで、高い静摩擦係数を示したと考えられる。また、表面粗さが小さいローラを用いた際に高い静摩擦係数を示した要因として、フィルムとローラ間のすき間が狭くなることが考えられる。二面間のすき間が狭くなることに伴い、メニスカス力や分子間力といった二面間を引き付ける強い表面張力が働き、真実接触面積が大きくなったことで高い静摩擦係数を示したと考えられる。

以上の実験結果より、湿度、張力、ローラ表面粗さの3因子はそれぞれフィルムの変形を助長する働きを持つと考えられ、低張力、

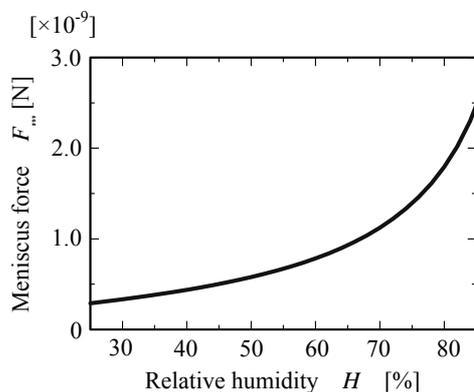
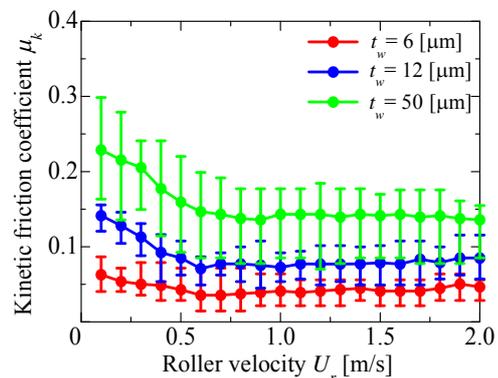


Fig. 8 Relationship between relative humidity and meniscus force

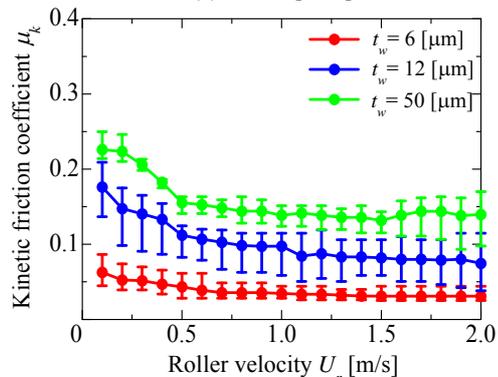
高湿度かつ表面粗さの小さいローラを用いた際に、最も高い静摩擦係数を示した。

(2) 動摩擦実験

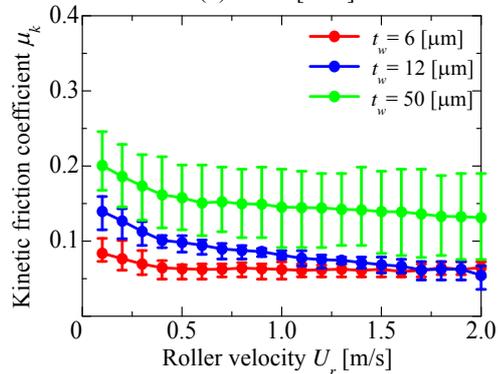
図9に各張力時における動摩擦係数の結果を示す。同図(a)~(c)は横軸にローラ周速度 U_r [m/s]を、縦軸に動摩擦係数 μ_k を示している。また、図中のプロットは5回測定の平均値を、エラーバーはそのばらつきを示している。測定結果より、動摩擦係数はローラ周速度に依存しており、すべり速度に依存しないというアモントン-クーロンの法則が成立していないことがわかる。これはフィルムとローラ間に巻込まれた空気により、二面間の摩擦状態が変化したためと考えられる。同図より、ローラ周速度 0.15~0.5 [m/s]付近において、周速度の上昇に伴い動摩擦係数が減少する傾向を示している。この速度領域では、



(a) $T = 40$ [N/m]



(b) $T = 80$ [N/m]



(c) $T = 120$ [N/m]

Fig. 9 Variation of friction coefficient with roller velocity as a parameter of tension

ローラ周速度の上昇に伴いフィルムとローラ間に巻込まれる空気量が徐々に増大し、二面間の空気層が次第に厚くなる。その結果、周速度の上昇に伴いフィルムとローラ間の真実接触面積が減少し、それと同時に動摩擦係数も減少したと考えられる。しかしながら、ローラ周速度 0.5~2.0 [m/s]付近では、動摩擦係数はほぼ一定の値を示している。この速度領域では粘性摩擦による影響が支配的になり、動摩擦係数がほぼ一定の値を示したものと考えられる。また、いずれのフィルム厚さにおいても張力が動摩擦係数に与える影響はあまり見られなかった。しかし、いずれの張力下においてもフィルム厚さの減少に伴い動摩擦係数が減少する傾向を示している。この要因として、静摩擦実験の結果と同様にフィルムの膜厚さの減少に伴う曲げ剛性の低下が考えられる。フィルムはローラの回転により巻込まれた空気とガイドにより、凸状に変形する。この際のフィルムの変形量はフィルム厚さの3乗に比例する曲げ剛性の影響が支配的であり、この曲げ剛性はフィルム厚さの減少に伴い減少する。したがって、薄いフィルムの方が厚いフィルムに比べて変形し、フィルムとローラ間の真実接触面積が減少することで動摩擦係数が減少したと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9件)

砂見雄太, トライボロジストとしての過去・現在・未来, トライボロジスト, 査読有, 60, 2015, 126-131.

Hiromu Hashimoto, Yuta Sunami, Hagino Fujita, Effect of Static Electricity on Static Friction Force between Plastic Film and Steel Roller, IMechE Part J: Journal of Engineering Tribology, 査読有, 228, 2014, 1008-1014.

Masayuki Ochiai, Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Study on Angular Displacement Characteristics on Topological Optimum Design of Hydrodynamic Thrust Air Bearing, IMechE Part J: Journal of Engineering Tribology, 査読有, 228, 2014, 997-1007.

Masayuki Ochiai, Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Vibration Response Characteristics against the Radial and Axial Shocks on Small Size Hard Disk Drive Spindle Supported by Oil Film Bearings, Journal of Mechanics Engineering and Automation, 査読有, 4, 2014, 547-554.

Yuta Sunami, Yasushi Fujiwara, Yusuke Kotobuki, Hiromu Hashimoto, Experimental Study on Friction Characteristics between Plastic Film

and Steel Roller, Proc. of The 3rd International Conference on Design Engineering and Science, 査読有, 2, 2014, 160-163.

〔学会発表〕(計 17件)

藤本英治郎, 砂見雄太, 橋本巨, プラスチックフィルムと鋼ローラ間の摩擦特性に与えるローラ表面粗さの影響, 日本機械学会関東学生会第 54 回学生員卒業研究発表講演会, 2015 年 3 月 20 日, 横浜国立大学(神奈川県横浜市)

藤原靖, 砂見雄太, 橋本巨, プラスチックフィルムと鋼ローラ間のトライボロジー特性に関する基礎研究, トライボロジー会議 2014 秋 盛岡, 2014 年 11 月 5 日, アイーナいわて県民情報交流センター(岩手県盛岡市)

藤原靖, 砂見雄太, 橋本巨, プラスチックフィルムと鋼ローラ間の摩擦特性に及ぼす雰囲気の影響, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 10 日, 東京

服部啓徳, 砂見雄太, 橋本巨, 周囲条件がプラスチックフィルムと鋼ローラ間の静摩擦力へ及ぼす影響, 日本機械学会 IIP2014 情報・知能・精密機器部門講演会, 2014 年 3 月 18 日, 東京電機大学(東京都足立区)

壽祐輔, 砂見雄太, 橋本巨, フィルム厚さがフィルムと鋼ローラ間の摩擦特性に及ぼす影響, 日本機械学会 IIP2014 情報・知能・精密機器部門講演会, 2014 年 3 月 18 日, 東京電機大学(東京都足立区)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.mech.u-tokai.ac.jp/~hashimoto_lab/index.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

砂見雄太(SUNAMI YUTA)

東海大学・工学部・助教

研究者番号: 10709702