

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05773

研究課題名(和文) R2RPE技術の確立を目指したウェブハンドリング技術の高度化に関する研究

研究課題名(英文) Study for Purpose of Advancement of Web Handling Technology to Establish R2RPE Technic

研究代表者

橋本 巨 (Hashimoto, Hiromu)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：40130877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、R2RPE技術の確立を目指した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、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、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、熱粘弾性と厚みムラを考慮した巻取りロール内部の応力解析とその実験検証を実施した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop web handling technology to establish Roll to Roll Printed Electronics. 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, 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, theoretically investigates and experimentally verifies winding condition optimization and in-roll stress in consideration of the viscoelastic property and web thickness profile at a constant rewinding tension. Results show that the predicted values are in agreement with the measured values.

研究分野：ウェブハンドリング

キーワード：ウェブハンドリング トライボロジー 摩擦 巻取り 熱粘弾性 厚みムラ 画像認識技術

### 1. 研究開始当初の背景

図1は、プリンティッドエレクトロニクス技術(P E技術)を用いて生産される高機能フレキシブル製品の世界規模の需要予測を示したものである。2022年には、これら高機能フレキシブル製品の市場が3兆円規模に上ると予測されている。ウェブハンドリング技術に基づいて生産される素材(中間部材)・製品はこれまでのところ我が国が他の先進諸国に比べて圧倒的に高いシェアを占めている。しかしながら、今後も他の先進諸国の追随を許さず、その地位を不動のものにするためには本研究の対象である高機能フレキシブル製品の大量生産を可能とする革新的なロール・ツー・ロール・プリンティッドエレクトロニクス技術(R 2 R P E技術)を世界に先駆けて確立する必要がある。しかしながら、現在ほとんどの半導体、ディスプレイ、電子製品は、フォトリソグラフィ技術を用いて電子回路のパターンが形成されている。同技術を用いた生産方式では、生産速度が極めて遅く、大量に低コストで生産することが困難である。したがって、生産性に限界があり、製品の面積化を図ることも容易ではない。従来技術であるフォトリソグラフィ技術は、電子線描画装置、真空ラインや高品質クリーンルームなど高価な設備が必要であり、エッチングなどの複雑な工程も多く、成膜材料の90%以上が無駄になるといったデメリットがある。一方R 2 R P E技術は、ロール搬送による連続液体プロセスを利用して常温下で必要な箇所に必要な材料を印刷することが可能であるため材料の無駄がなく、作業工程が非常にシンプルである。さらに、印刷装置以外に高価な装置を必要としないためフォトリソグラフィ技術に比べて低コストである。さらに、R 2 R P E技術を用いることで電子回路だけでなく、リチウムイオン二次電池用コンデンサ、燃料電池車用セルスタックなどのエネルギー産業、織物などのテキスタイル産業、医療用人工生体膜や薄膜センサなどの次世代の

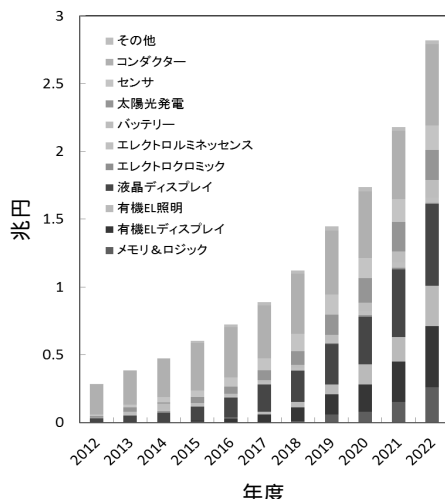


図1 PEの市場予測(出典:ID TechEX)

医療・福祉・ヘルスケア産業へも幅広く応用展開することが可能である。以上のように、R 2 R P E方式は我が国におけるものづくりの基盤技術となる可能性が極めて大である。

### 2. 研究の目的

情報、自動車、エネルギー・環境、医療など今後日本経済の中核をなすものづくり産業分野において、ディスプレイ用各種光学フィルム、リチウム二次電池や燃料電池用フィルム、医療用人工生体膜などの製造技術は、各分野における一層の発展に必要不可欠な技術である。これらの素材は、その製造過程でウェブと呼ばれている。今後、さらに大きな成長が期待されるウェブ製造分野では、プリンティング技術の進歩に見合うだけの高度なウェブハンドリング技術が要求される。本研究では高機能フィルムを高精度で大量に生産することが可能なウェブハンドリング技術とプリンティング技術を融合した革新的なロール・ツー・ロール・プリンティッドエレクトロニクス技術の確立を目指して、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する。

### 3. 研究の方法

フィルムと鋼ローラ間の摩擦特性に及ぼす静電気、温・湿度、ローラの表面粗さの影響を詳細に調べ、トラクション予測モデルを構築してその適用性を実験的に検証した。研究室で現在所有している摩擦試験機を恒温恒湿設備の中に設置し、温度・湿度を一定に保った状態で摩擦実験を行った。摩擦実験を実施する際は、固定されたローラ上に両端におもりを付けたプラスチックフィルムを乗せ、他端のおもりの重量を増やしていきフィルムがすべり出した瞬間の張力の比をオイラーのベルト公式に代入して摩擦係数を算出した。また、実験中に発生した静電気を定量的に評価するためフィルムと鋼ローラ間に発生した表面電位を表面電位計により測定し、静電気と摩擦係数との関係について詳細に考察する。さらに温・湿度や各種フィルムの厚さや幅、ローラの表面粗さなどを変化させた場合の摩擦係数についても検討した。

幅方向の厚みむらを考慮した高機能フィルムにおける巻取り問題に取り組んだ。P E技術によって製膜された幅方向に厚みむらのあるウェブの巻取りロール内部応力に及ぼす影響とこれに伴うゲージバンドや巻きずれなどの不具合の発生について理論・実験の両面から検討し、さらに同理論を利用した最適巻取り張力を導出した。

インクジェットなどの多品種生産に極めて高い利点を有するPE技術では、印刷工程においてフィルム上にわずかなしわが発生しても正確なプリンティングが極めて困難になる。そこで、図2の装置を用いて搬送中に発生する微小じわの観察・計測を行った。搬送中のフィルム表面に発生するしわにカメラにより計測し、その計測した微小じわの情報を制御ソフトLabVIEWを介して調整ローラに取り付けられたアクチュエータに送ることで隣接するローラ間のミスアライメントを自動で修正するシステムを構築した。

#### 4. 研究成果

図3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(18)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示し、エラー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

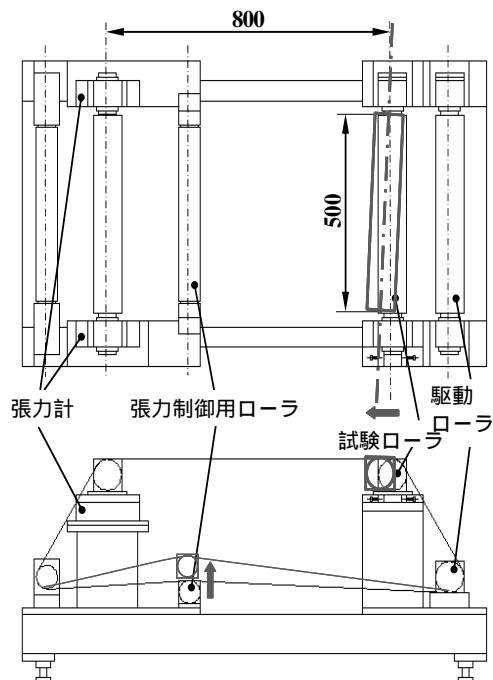
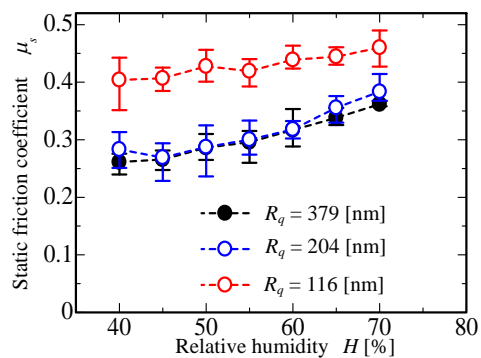


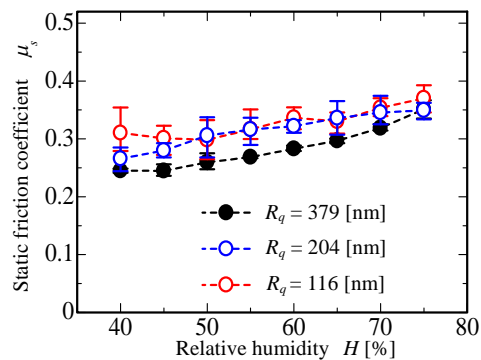
図2 ウェブ搬送試験装置

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。

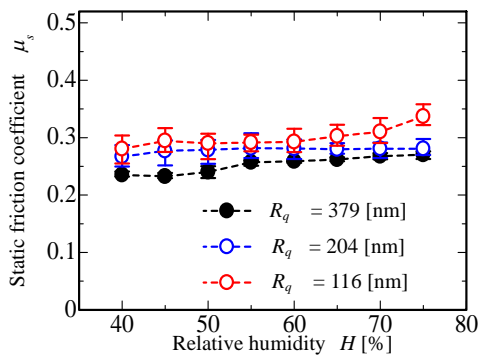
図4に本最適設計により得られた結果を示す。同図(a)は本最適化問題を解いた結果であり、図中の破線は最適ニップ荷重を、実線は最適張力をそれぞれ表している。同解析結果より、張力関数はニップ荷重関数に比べ大きな変化が見られた。また、図5(a)~(c)は一定張力および最適化張力・最適ニップ荷重による各ローラ半径位置における軸方向の半径方向応力の解析結果を表している。また、時間経過に伴う内部応力の変化を各



(a)  $T = 6$  [N/m]



(b)  $T = 12$  [N/m]



(c)  $T = 25$  [N/m]

図3 ローラの表面粗さを変更した際の静摩擦係数

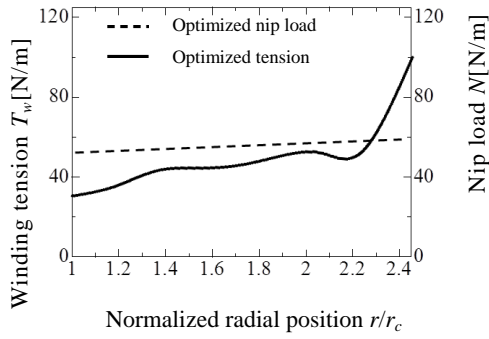
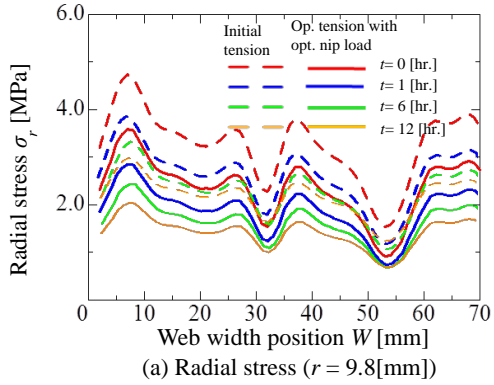
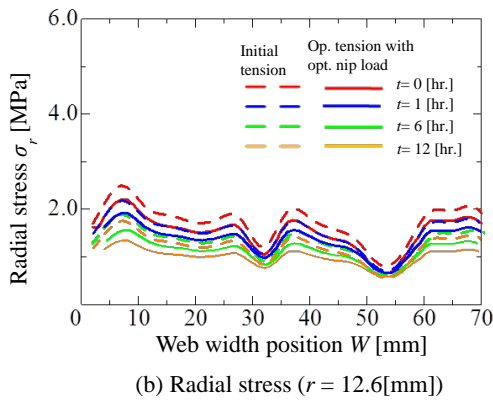


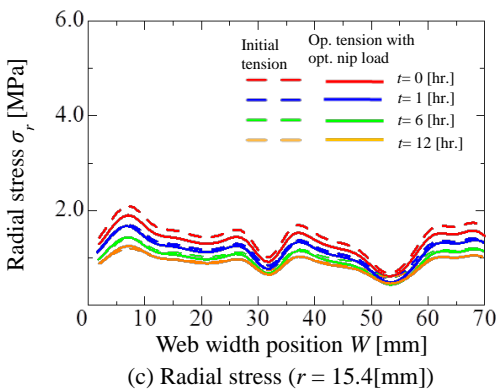
図4 最適化張力と最適化ニップ荷重



(a) Radial stress ( $r = 9.8$ [mm])



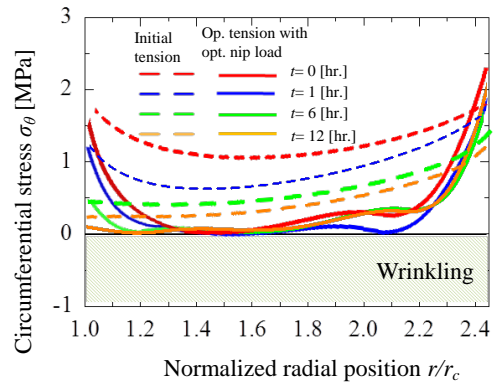
(b) Radial stress ( $r = 12.6$ [mm])



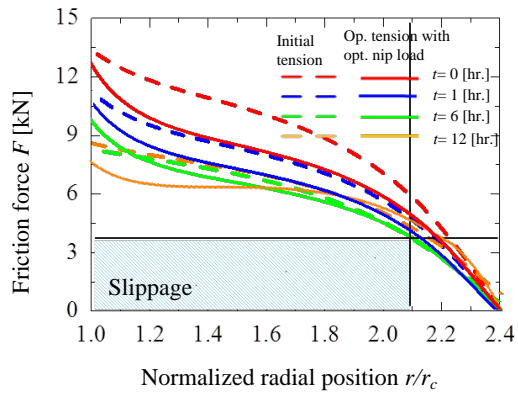
(c) Radial stress ( $r = 15.4$ [mm])

図5 半径方向内部応力

色で示している。結果より、最適張力による半径方向応力は一定張力に比べ、内層ほど低下していることがわかる。さらに、同図(b)において最大の応力値を示すウェブ幅位置 10[mm]では半径方向応力の低下が最大となっていることがわかる。ゲージバンドは最も半径方向応力が大きい幅位



(a) Circumferential stress



(b) Friction force

図6 円周方向内部応力ならびに摩擦力

置において生じやすいことから、本最適設計を用いることでゲージバンドの防止に有効であると示唆される。

一方で、時間経過に伴う応力状態を見ると、時々刻々と半径方向応力が減少している。これは、応力に応じて巻取りロール内のフィルムがクリープ変形したためと考えられる。なお、図 6(a), (b)はそれぞれ一定張力および最適張力・最適ニップ荷重による円周方向応力と層間摩擦力の解析結果を示している。同図(e)に示すように巻取り後 12 時間経過した場合においても臨界摩擦力を上回っていることから巻きずれは生じないものと考えられる。また、同図(f)においても最適張力・最適ニップ荷重による解析値は不具合発生の危険領域に生じていないことがわかる。以上の結果から、本最適設計を用いることで巻きわや巻きずれ、ゲージバンドを同時に防止可能であると考えられる。

図7に、本実験に使用した搬送試験機を示す。本試験機は5本の鋼ローラを介してPETフィルムをループ状に貼り合わせ、ローラとのトラクション力(摩擦力)によりフィルムを搬送する。下流側のローラに対してステップモータが接続しており、任意のミスアライメント角度を与えることが可能となっている。フィルムの搬送速度は 0.15~5.0 [m/s]の範囲で設定可能となっている。また、張力はロードセルで検知しており、Web力



メラによって搬送時のフィルムの様子を撮影している。

本実験ではC言語を基本として、各機能をもったアイコンを繋ぎ合わせることで、比較的容易にプログラムを作成することが可能であるLabVIEWを用いて独自にプログラムの構築を行った。トラフを検出した場合は、その向きによってモータを駆動させて修正を開始する。その後トラフが確認できなければプログラムを停止する。

図8(a)に撮影画像を示す。同図より、フィルム全体を撮影するために、斜めから撮影を行った。そのため遠近法による歪み生じており、現実のローラ間の距離を基準として図6(b)に示すように垂直方向から撮影した画像のように校正を行った。その後、画像内の各ピクセルの輝度に基づいて、閾値以下のものを0(黒)、閾値以上を1(白)とする二値化法を用いて画像処理を行う。このとき、画像全体の輝度を用いてしきい値を決定するグローバル二値化ではなく、対象となる周囲の近接ピクセルの輝度のみを用いてしきい値を決定するローカル二値化を用いた。これにより、光源に近いところの輝度が高くなってしまふ影響を少なくすることが可能となった。その画像処理を行った画像の指定した領域内において、水平方向の各検出線上の明と暗の境目(エッジ)に交点を設ける。各交点に対して最小二乗法を用いて近似線を描き、領域内での垂直線とのずれにより、トラフの向きを算出することが可能である。その後算出した角度の数値の正負によってモータの回転方向を変更し、ローラ位置をミスアライメントが減少する方向へ移動させる。この動作を繰り返すことで少しずつトラフが減衰する方向へローラの傾きを補正することが可能である。なお、プログラムは、最小二乗法を用いて算出した角度が $-1.0[\text{deg}] \sim 1.0[\text{deg}]$ の範囲に収まった際に停止する条件となっている。

図9に、本実験で撮影した画像およびトラフを検出するために二値化を行った画像をそれぞれ示す。同図(i)(a)、(ii)(a)に示すように、ローラを上流側に傾けた際を+方向、下流側に傾けた際を-方向とする。同図(i)(b)、(ii)(b)より、フィルム表面上に発生するトラフの存在とローラを+方向、-方向に傾けた際に生じているトラフの方向が異なっていることを確認した。しかしながら、撮影した画像を用いてトラフの抽出を行った場合、背景やフィルムに均一に光が照射されないためトラフの検出が困難である。そこで、画像全体の輝度に依存しないローカル二値化を行うことで背景との分離が可能となり明確にトラフを抽出できた。また同図より、撮影画像と同様に生じているトラフを抽出することが可能であると確認した。

以上のように、画像認識技術を用いることにより折れしわを生じることなくフィルムを搬送可能なシステムを構築することができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Hiromu Hashimoto, Intelligent Winding

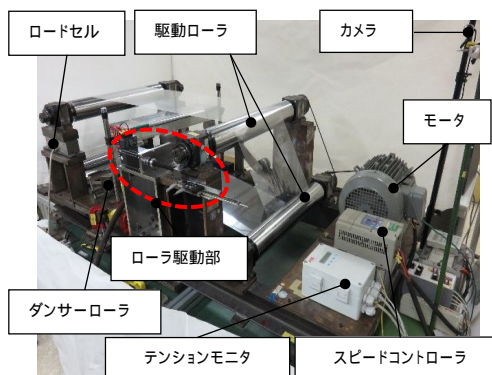
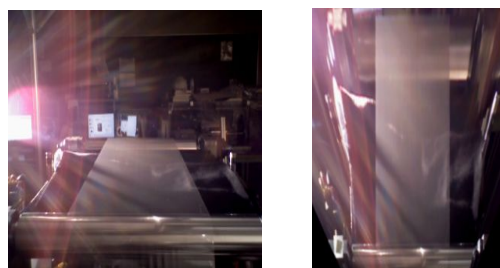


図7 実験装置の概観



(a) 撮影画像(校正前)

(b) 校正後

図8 画像の校正

Machine of Plastic Films for Preventing Both Wrinkles and Slippages, Modern Mechanical Engineering, 査読有, 6, 2016, 20-31. Hiromu Hashimoto, Yuta Sunami, Optimization of Winding Conditions for Preventing Roll Defects Caused by Thermo-viscoelastic Property and Its Experimental Verification, Mechanical Engineering Journal, 査読有, 6, 2, 2015, 1-12. Hiromu Hashimoto, Yuta Sunami, Optimization of Winding Conditions Considering Web Thickness Variation in Width Direction and Experimental Verification, Mechanical Engineering Journal, 査読有, 6, 2, 2015, 1-12.

〔学会発表〕(計17件)

Seiya Iiyama, Hikaru Sugiishi, Hiromu Hashimoto, Yuta Sunami, Internal Stress Analysis of Wound Roll Considering Film Thickness Variation and Elastic Deformation, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, 2015. Hiromu Hashimoto, Tribology in Web Handling, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, 2015. Yuta Sunami, Yasushi Fujiwara, Hiromu Hashimoto, Tribological

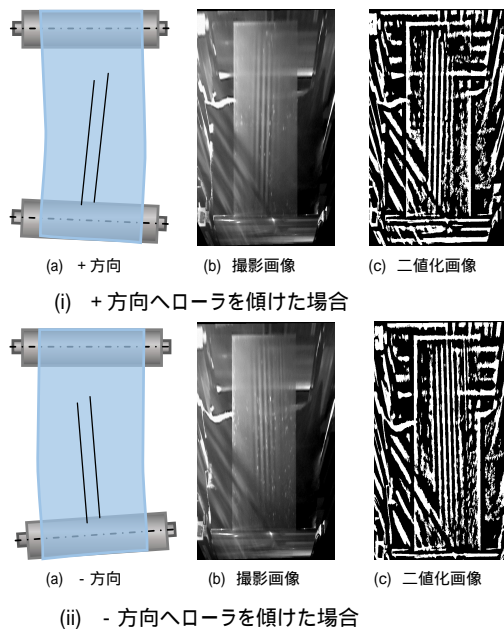


図 9 ローラの様子および撮影画像, 二値化画像

Characteristics between Plastic Fil and Steel Roller, International Tribology Conference, Tokyo 2015.

Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Tribological Characteristics between Thin Plastic Fil and Steel Roller, 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, 2015.

Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Measurement of Internal Stress Distribution of Wound Roll in Axial Direction, 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, 2015.

Hiromu Hashimoto, Yuta Sunami, Optimization of Winding Conditions for Preventing Roll Defects Caused by Thermal-Viscoelastic Property, 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, 2015.

Hiromu Hashimoto, Optimization of Winding Conditions for Preventing Roll Defects Caused by Thermal-Viscoelastic Property and Experimental Verification, Thirteenth International Conference on Web Handling 2015, 2015.

Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Friction Characteristics between Plastics Film and Steel Roller, Thirteenth International Conference on Web Handling 2015, 2015.

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.mech.u-tokai.ac.jp/~hashimoto\\_lab/index.html](http://www.mech.u-tokai.ac.jp/~hashimoto_lab/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本巨 (HASHIMOTO HIROMU)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：40130877

### (2) 研究分担者

砂見雄太 (SUNAMI YUTA)

東海大学・工学部・講師

研究者番号：10709702