

巻き角の変更による高分子フィルム搬送時のトラフに関する実験およびFEM解析との評価

Experimental Evaluation and FEM Analysis of Trough Wrinkles in Polymer Film Transport for Different Wrap Angles

東海大（正）*後藤 宏弥 東海大（非）林 楓昌 東海大（非）八十田 穰 東海大（正）砂見 雄太

Hiroya Goto*, Lin Fengchang*, Yutaka Yasoda*, Yuta Sunami*

*Tokai University

1. 緒言

近年の軽量性、柔軟性の増加傾向から有機薄膜太陽電池や有機 EL ディスプレイなどの製品において、薄膜化が進んでいる。これらの薄く、柔軟かつ長尺な製品は工学的にウェブと呼ばれ、ロール・ツー・ロール（R2R）生産方式によりローラで支持しながら搬送し、同時に塗工、印刷、ラミネート等の加工工程を施すこと高速かつ大量に生産することが可能である。

この生産方式では、搬送中にウェブ幅方向内側に対して圧縮応力が働くことでトラフと呼ばれる波状の座屈変形が生じやすい。トラフは、塗工時における塗布の均一性悪化やローラ表面進入時に塑性変形した状態である折れしわへと繋がる。トラフの発生はローラの配置に強く依存するため、設計段階から抑制および防止をすることが可能となる方法を確立することが求められている。先行研究において、FEM（Finite Element Method）解析を用いることでローラ間において発生するトラフの予測を行った研究が報告されている²⁾が、実際の実験と比較された研究例が少ない。

そこで本研究では、R2R 生産方式における欠陥予測の手法確立を目的に FEM によるトラフの構造解析および実験との比較を試みた。まず、一般的な高分子材料である PET（Poly Ethylene Terephthalate）フィルムを用いて、ローラのミスアライメントによるトラフの撮像実験をした。その際、2 台のカメラを使用するステレオ DIC（Digital Image Correlation）を用いることでトラフを定量的に評価した。そして、トラフ構造を撮影した実験系を FEM 上でモデル化し、解析したトラフと比較することで R2R 生産方式における FEM 解析の有効性を評価した。

2. 実験方法

2.1 ステレオ DIC を用いたトラフ撮像実験

Figure 1 に本実験に用いた搬送装置の概要図を示す。本装置は 5 本のローラを介してループ状に厚み 25 μm 、フィルム幅 210 mm の PET フィルムを張り合わせることで半永久的な搬送を行った。また、1 対のローラの片側に MA（MisAlignment）を任意に設定でき、トラフを誘起することが可能である。発生したトラフを 2 台のカメラを用いたステレオ撮影で撮像し、3 次元構造を解析できるステレオ DIC を用いて定量的に評価した。撮影に使用したカメラは、カトウ光研株式会社のハイスピードカメラ k8-USB を使用した。table 1 に撮影条件を示す。巻き角は、MA ローラ直前に位置しているローラを移動することで 60、125 deg に調整し、張力 142 N/m、MA 角度 0.25 deg、速度 1.0 m/min の搬送条件で実験を行った。

2.2 FEM を用いたトラフの解析

Figure 2 に本解析モデルを示す。本解析では、FEM 汎用解析ソフトである、MSC. Marc Mentat を用いて弾性域内での弾性解析およびローラとの接触による非線形静的構造解析を行った。解析条件として、幅 210 mm、厚さ 25 μm 、長さ 2.1 m のフィルムを 7 mm の正方形メッシュで幅方向に 30、搬送方向に 300 のシェル要素で分割した。また、弾性係数は 5 GPa、ポアソン比 0.3、ローラは剛体で、MA 角度および張力は実験条件と同様の数値にし、約 300 mm ほど搬送させた。摩擦係数はオイラーのベルト理論³⁾を用いて実際に測定した値である 0.33 を用いて解析を行った。

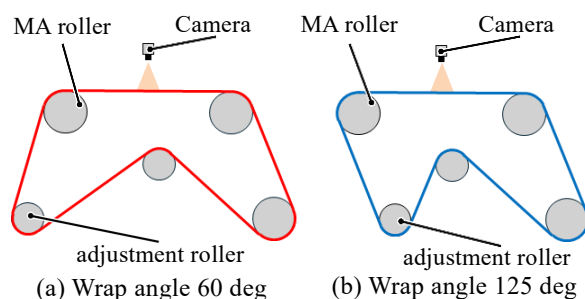


Fig. 1 Transport machine overview

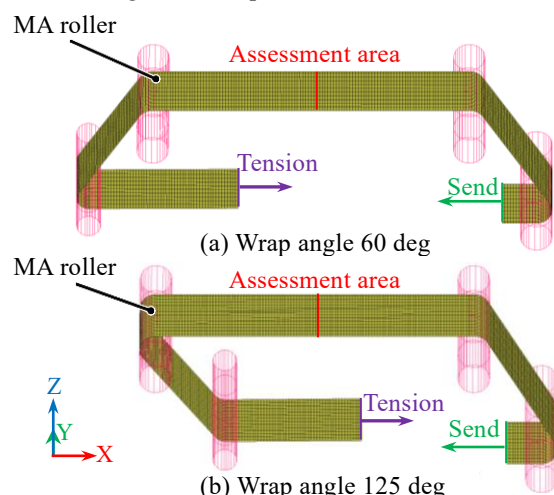


Fig. 2 FEM analysis model overview

Table 1 Sample of table

Focal distance, mm	5.0
Framerate, fps	100
Shutter speed, -	1/1000
F-number, -	f 2
Resolution, -	2592×2048

3. 結果および考察

Figure 3, Figure 4 に各巻き角におけるステレオ DIC と FEM の解析結果を示す。縦軸はフィルム厚さ方向の変位を、横軸はフィルムの幅を示しており、オレンジとピンクの枠線はそれぞれトラフ高さの範囲と間隔を示している。Fig. 3, Fig 4 より、DIC 測定におけるトラフ高さは巻き角 60 deg で約 0.48 mm、巻き角 125 deg で約 0.53 mm であった。また FEM 解析においては、巻き角 60 deg で約 1.26 mm、巻き角 125 deg で約 1.91 mm であった。比較すると、どちらの結果においても巻き角の増加に伴いトラフ高さが増加している。搬送時に発生するトラフは、フィルムとローラ間の摩擦力によってフィルムの弾性回復が抑えられるため発生すると報告されている⁴⁾。このことから、巻き角が大きいほどローラとフィルムの接触面積増加に伴い摩擦力も増加するため、弾性回復力が制限されトラフ高さが増加したと考える。

また、測定結果と解析結果のトラフ高さにおいて乖離していることを確認した。これに対して、本研究における FEM 解析は塑性域を考慮していない静的構造解析となっており、実験では MA で局所的な張力増加が発生し、弾性域を超えた可能性が考えられ、測定結果と解析結果における弾性域と塑性域のひずみ量の違いからトラフ高さに乖離が生じたと考える。

次にフィルムの変形形状に着目する。巻き角における測定結果および解析結果においてトラフの本数一致しており、トラフ発生位置においてウェブ幅 70 mm から 140 mm の間で発生し、2 本目のトラフ高さが小さいことを確認した。また、トラフの間隔において、巻き角における測定結果と解析結果とで概ね一致した。このことから、接触面積増加に伴う摩擦力の影響はトラフ高さに深く関係しており、FEM 解析においても同様の結果が得られたため、不具合予測手法として有効性があることを確認した。

4. 結言

R2R 生産方式における欠陥予測の手法確立を目的に、巻き角を変更した際のステレオ DIC によるトラフ構造の測定および FEM を用いたトラフの解析結果を比較した。その結果、巻き角の増加に伴いトラフ高さが増加することを確認した。しかしながら、DIC 測定結果および FEM 解析結果においてトラフ高さに乖離が発生した。フィルムの変形形状においては、どちらの結果においても発生しているトラフの本数や発生位置および間隔が概ね一致していることを得た。また、巻き角を変更した際のトラフに与える影響が FEM 解析で再現できることから予測手法として有効性があることを確認した。

文献

- 1) カンセンエキスパンダー工業株式会社, “シワを検知してエキスパンダーロールで自動除去。10 μ m サイズも見逃さず、数値による管理も”, コンバーテック 2021 年 4 月号, (2021), pp.25-28
- 2) 矢鍋重夫, 永澤茂, 金子智, “ローラの傾きによって生じるウェブ並みしわシミュレーション(傾きシワ数の変化および歪分布や位置の不整としわ発生に関連)”, 日本機械学会, Vol84, No.859, (2018)
- 3) 中嶋正仁, “ベルトの摩擦”, 日本ゴム協会誌, 70 巻, 4 号, (1997), pp. 181-186
- 4) 橋本巨, “プラスチックフィルムの搬送時におけるしわとスリップの発生に関する理論と実験”, 日本機械学会論文集, 77 巻, 773 号, (2011)

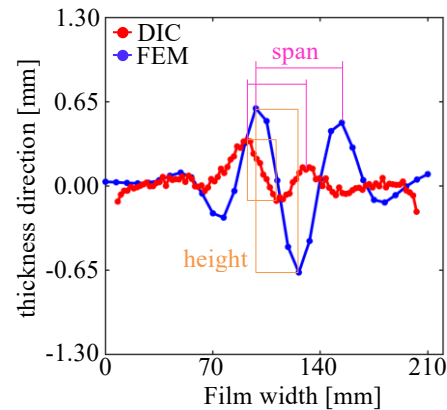


Fig. 3 DIC and FEM results at wrap angle 60 deg

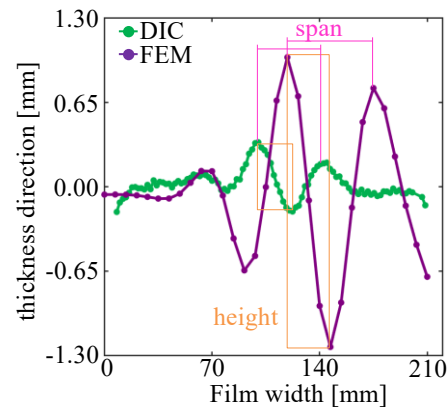


Fig. 4 DIC and FEM results at wrap angle 125 deg