

第1章 巻取理論とウェブのシワ

平山 正廣

はじめに

現在、フィルム製造業界、製紙業界では多種多様にわたり大量のフィルム、紙が生産され、軟包装業界で、フィルム、紙を用いて、印刷、ラミネート加工およびその後のスリッター、製袋と加工されている。

生産現場では、フィルム、紙等の印刷及びドライラミネーション、ノンソルベントラミネーション、押出ラミネーション、コーティング加工中のシワ・蛇行・スリップ、カール等の不具合、フィルム、原紙加工後の巻取り工程でのウェブのシワやスリップ、経時後の巻取り状態での不具合現象であるディフェクト現象、その内で特異的現象であるスターディフェクト（巻き締りによる菊模様の発生）やテレスコープ（巻きずれ）・ゲージバンド（偏肉）が問題になっている。

従来、上述したウェブのシワ、蛇行、ロールとのスリップ、巻取状態での問題は、モデルの構築や計測方法の難しさにより定量的なアプローチが少なく、個々の生産現場や機械メーカーで積み重ねられた経験と勘によって、各コンバーター、機械メーカー独自で解決がなされたのが現状である。

加工工程でのウェブの不具合現象、スリッター工程における諸問題をウェブハンドリング技術と位置付け、ウェブハンドリング技術の学問的体系が望まれてきた。

巻き取りにおけるディフェクト問題、加工工程でのウェブの折れしわ、座屈、カール問題をウェブを構成するフィルム等の問題と考え、問題の原因および改善・改良技術を下記の学問領域をもって解決を図りたい。

- ① フィルム、原紙の材料の基本物性、および粘弾性学を含む材料工学と力学、高分子化学
- ② トライボロジー学での摩擦学、表面工学
- ③ 加工中の空気流入流体工学、レオロジー、計測工学

1. ウェブの加工と巻取理論に要求される基本的力学的性質の基礎法則と理論

巻取理論は、ウェブ（紙、ポリエステル等のプラスチックフィルム、金属等）をいかに不良発生させずに巻き上げるかを論じる。

このような理論を巻取研究拠点である米国オクラホマ州立大学ウェブハンドリング研究センターでは、次のように定義している。

「ウェブとは、薄くて柔軟な連続媒体であり、張力を受けた状態で搬送され、印刷、乾燥、塗布、ラミネーションなどを含む様々な工程を経て最終製品に仕上げられる。ウェブプロセスは多くの自動化された産業分野に広く導入されている。ウェブハンドリングとはウェブの破損や損失を生じることなく安定した搬送を達成するための科学技術である」。

プラスチックフィルムに印刷、コーティング等の加工を施すとき、フィルムは多くの駆動用ロールやガイドロールにより搬送されながら乾燥等の工程を経て製品化され、ロール状に巻き取られる。フィルムは巻き出しから多数のロールを介して搬送される。ロールとフィルム間の摩擦力（トラクション力）を適度に保ち、フィルムのスリップ、横すべり、蛇行、シワを防止して確実に搬送する必要がある。

さらに、巻き取り時も、巻きずれやシワなどの不具合現象の防止に努めねばならない。

これらの不具合現象に大きな影響を及ぼすのが「フィルムとロールの間の空気膜の量（空気膜厚さ）」「フィルム間に巻き込まれる空気膜の量」と、巻き取り後に発生するフィルムの内部応力である。空気膜は実際数 μm 程度の極めて薄い膜であり、この空気膜が摩擦力を低下させ、不具合現象の原因となるとともに、しわ等の改善にもつながる。

またフィルム等の巻取理論を考えると、下記の4点を理解する必要がある。

- ① ウェブは、エネルギー最小の原理に従って変形したり運動したりする。
- ② ウェブは、外力の作用により伸びる、曲がる。
- ③ ウェブ搬送・巻き取りには摩擦力（トラクション力）が大きく関与する。その際、空気巻き込みの影響は無視できない。
- ④ 搬送中のウェブは、ウェブとロール間の摩擦力が十分な大きさを保持しながら搬送する限り、下流側のロール軸に対して直角方向（ウェブ入射法則）に進入する。

1.1 ウェブの力学的性質

1.1.1 ウェブのフックの法則

2本のロール間にあるウェブには張力が作用する。また一対の内力も発生する。この内力を応力と言い、単位断面積当たりの力で表す。

ウェブに作用する力が、引張力のときは引張応力、圧縮力のときは圧縮応力が発生する。

ウェブには、引張方向（縦方向）に引張方向ひずみ（引張ひずみ）、巾方向（横方向）に巾方向ひずみ（圧縮ひずみ）が発生する。引張ひずみに対する圧縮ひずみの割合がポアソン比であり、 $-\varepsilon' < 0$ （圧縮）、 $\varepsilon > 0$ （引張）である。せん断力がウェブに発生する主原因は、2本のロールが平行でない場合（ロールのミスアライメント）であり、ロールの接触面上にウェブの巾方向に沿うせん断力が作用する。またせん断応力も発生する。

せん断ひずみは、ひずみ距離 e をスパン長 L で除した値 δ で表し

$$e = L \tan \theta \div \theta \text{ で、} \delta = e/L = \tan \theta \div \theta$$

になる。

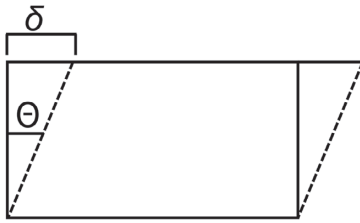


図1 セン断ひずみの模式図

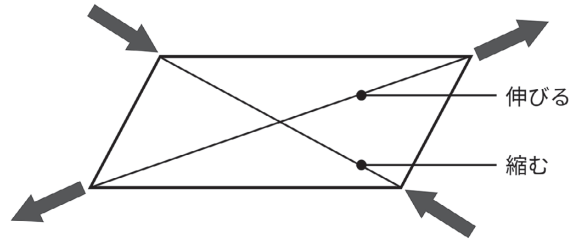


図2 セン断力とせん断変形図

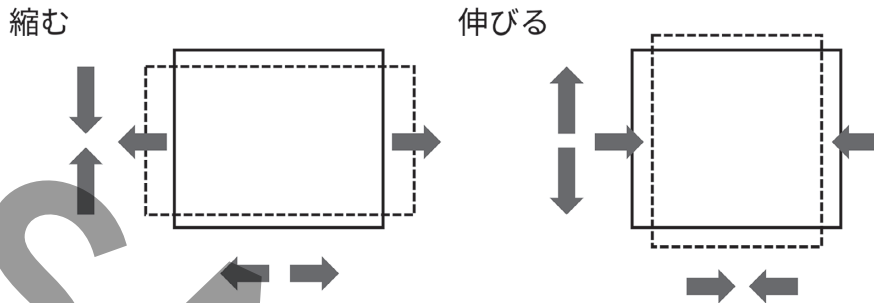


図3 ウェブの伸び、縮みの模式図

フックの法則は応力とひずみの関係であり、ウェブハンドリングでは引張応力と縦ひずみの関係が大切である。

応力-ひずみ曲線は各材料の引張試験で得られ、

- ① 鋼の応力-ひずみ曲線は、弾性変形、塑性変形と降伏応力を有す。
- ② 非金属は明確な降伏点が現れないのが特徴である。
- ③ 紙の応力-ひずみ曲線は、鋼・非金属と同様に弾性変形から塑性変形へ移行するが、非金属同様に明確な降伏点は現れない。しかしMD（搬送）方向とCD（巾）方向では、強度は明確にMD方向が強くなる。
- ④ プラスチックフィルムも、弾性変形から塑性変形に移行するが、フィルム製造時の延伸方法により、二軸延伸フィルムは、MD、CDで応力-ひずみ曲線が異なる。

各種のウェブで応力-ひずみ曲線は異なるが、引張力が作用すると初期では応力とひずみは直線関係を示し、ひずみがあまり大きくない範囲では両者は比例関係にある。すなわち、ウェブはばねのように挙動する。よってウェブ搬送時は常にこの状態を保つ必要がある。このとき、ヤング率（E）を有するフックの法則が成り立つ。

引張方向（MD、CD方向）でヤング率が同一なウェブを等方性ウェブと言い、金属材料は等方性ウェブである。紙、プラスチックフィルムはMD、CDではヤング率が異なった値を示し、引張方向でヤング率が異なるウェブを非等方性ウェブ、異方性ウェブという。

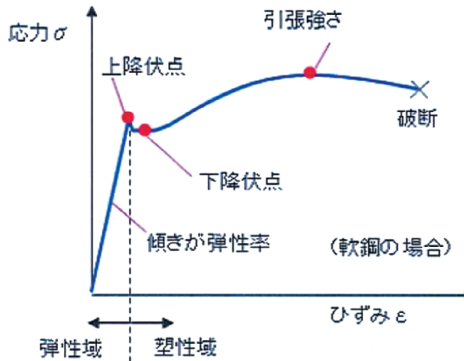


図4 軟鋼の応力-ひずみ曲線

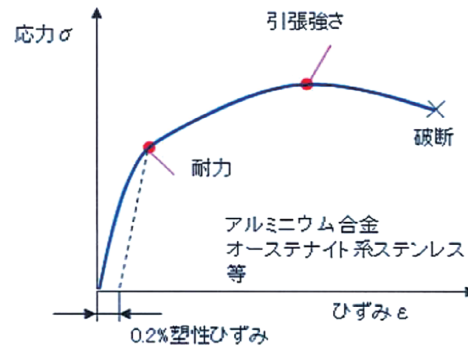


図5 鋼以外の金属の応力-ひずみ曲線

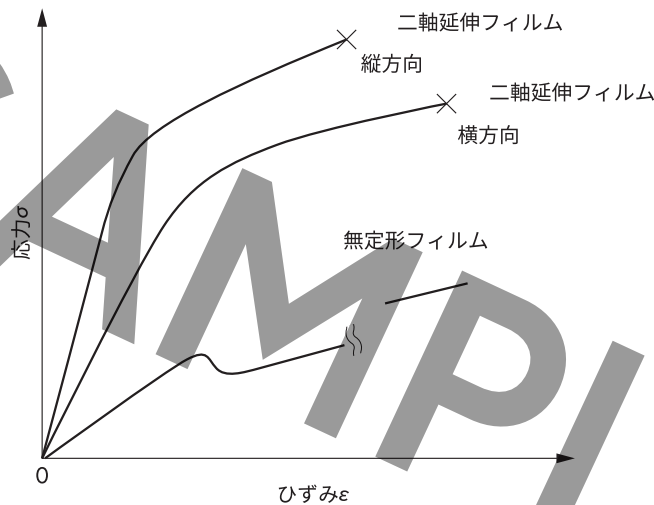


図6 プラスチックフィルムの応力-ひずみ曲線

1.1.2 ウェブの弾性、粘性、粘弾性

金属の応力 - ひずみにおける等方性は、次のようなメカニズムで発現する。金属は結晶構造をしており、格子間には原子間力が働いて、マクロ的には剛性の強いばねによって結合されている。引張力を一様に作用させると、格子点は、ばねの作用で一様に変形する。しかし引張力を除去すると、原子間力が大きいいため復元力が発生し、各格子点は元に戻る。

また、せん断力を作用させると格子点はひずみ角を生じるが、せん断力を除去すると、復元力により元の位置に戻る。よって金属は縦、横、奥行きの各方向に関係なく復元力が現れ、金属材料は等方性弾性体とみなされる。

紙は、セルロースが水素結合した構造で、分子間結合はファン・デル・ワールス力で原子間力に比べれば非常に小さいため、金属材料に比べれば伸びやすい。紙は MD に伸びにくく CD に伸びやすい配向状態に抄かれるため、MD のヤング率が CD のヤング率より高い。よって非等方性（異方性）弾性体を示す。