

KEYWORDS

構成方程式
レオロジー

上式右辺の第1項が瞬間コンプライアンス J_0 に相当し、言うまでもなく、その分母である $9.87 \times 10^9 [\text{Pa}]$ は試験に用いた紙のMDのヤング率に一致する。

以上に述べたようにウェブの微細構造は弾性、粘性、粘弾性と密接に関連しており、応力とひずみの関係について弾性の特性を表すのが式(14)（フックの法則）、粘性の特性を表すのが式(17)（ニュートンの粘性法則）、粘弾性（ここでは特にクリープ）の特性を表すのが式(28)（一般化フォークト・モデル）である。これらの式は総称して構成方程式と呼ばれている。また、ここで扱ったような物質の変形・流動を扱う科学と技術分野はレオロジーと呼ばれている。

本節では粘弾性までを扱ったために少し内容が高度なものとなった。しかしながら、ウェブハンドリング技術に真剣に取り組むうえで、本節で述べた程度の粘弾性の基本を理解しておくことは極めて重要である。なお、粘弾性について初心者向けに基礎から丁寧に解説した技術書、専門書は極めて少ないのが現状である。その意味で多くの読者に本節を大いに活用していただきたいと思う。

7. ウェブの曲げ

ウェブは柔軟な素材であるから、外力やモーメントが作用すると容易に曲がる。図3-29(i)は1スパン間のウェブ（ウェブスパン）において、CDの両端部にモーメントが作用したときの、ウェブの変形の様子を示したものである。このときウェブは、同図(a)に示すように2つの曲率 ρ_1 と ρ_2 を持つ曲面状に変形する。ウェブのスパン L が幅 W に比べて十分に大きいときには $\rho_2 \gg \rho_1$ となり、同図(b)に示すようにウェブはほぼ円筒状に曲がると考えられる。具体的には、 $L > 3W$ のときこの近似が成り立つと考えてよい。

図3-29(ii)は、MDの両端部（隣接する2本のローラとウェブの接線上）にモーメントが作用したときの、ウェブの変形の様子を示したものである。同図(a)に示すように、ウェブは2つの曲率半径 ρ_1 と ρ_2 を持つ曲面状に変形するが、ウェブの幅がスパンに比べて大きい場合には $\rho_1 \gg \rho_2$ となって、同図(b)に示すように、ウェブはほぼ円筒状に曲がる。具体的には、 $W > 3L$ のときこの近似が成り立つと考えてよい。

図3-29(iii)は、ウェブのMD、CDの端部すべてにモーメントが作用したときの変形の様子を示したものである。この場合には、ウェブは2つの曲率半径 ρ_1 と ρ_2 を持つ曲面状に変形する。なお、以上に述べたようなウェブの曲げによる変形をたわみ（deflection）と呼ぶ。

次に、図3-29に示したウェブの曲げによる変形（たわみ）を定量的に扱う際の実践的な考え方について述べよう。実際のウェブの曲げを考えると、図3-29に示したいくつかのパターンのうち、同図(i)、(ii)の(b)のパターン（円筒状の曲げ）が現れる頻度が最も高いと思われる。この場合には、ウェブをはり（梁）とみなし、一次元の問題として扱えるので、まず、以下にはりの曲げについて説明する。なお、この考え方を2次元に拡張して平板の曲げとして扱えば、図3-29の他のパターンに

たわみ deflection

はり

図3-29 (i) ウェブの曲げによる変形
ケース1

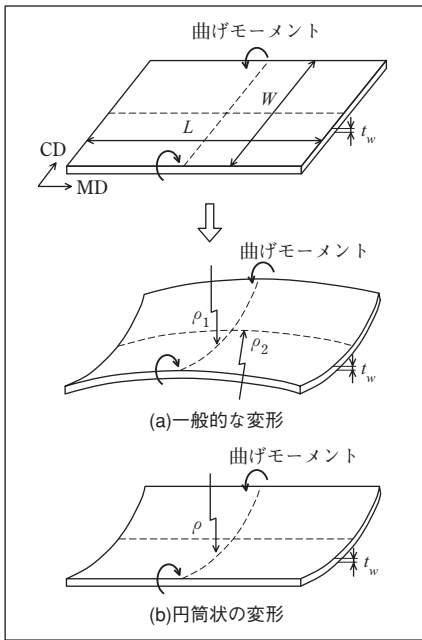


図3-29 (ii) ウェブの曲げによる変形
ケース2

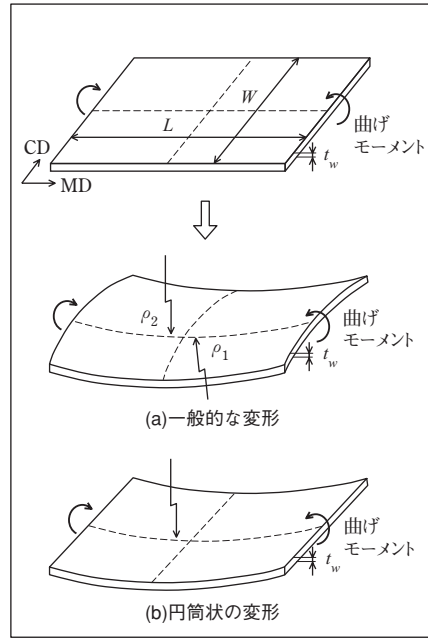
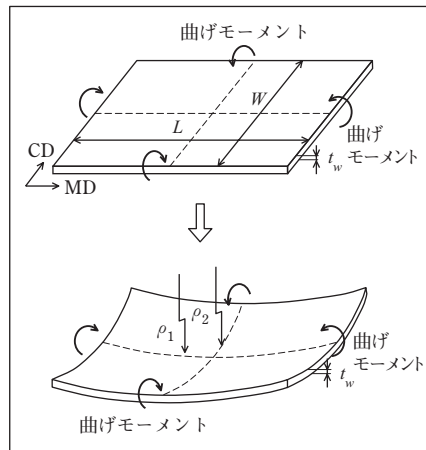


図3-29 (iii) ウェブの曲げによる変形
ケース3



についても同様の方法が適用できることは言うまでもない。

はりの曲げによる変形（たわみ）を定量化する際には、まず、次の仮定を置くことから始める。

「変形前にはりの中心軸線に垂直であった平面は、変形後も平面を保ち、かつ中心軸線に垂直である」

KEYWORDS

摩擦係数の低減を目的とした軟質皮膜は、皮膜が薄過ぎる場合や厚過ぎる場合にはその効果が損なわれる。一般に、皮膜の厚さには図4-21に示すような最適値があることに注意しよう。

ところで、式(56)によれば、粗さ突起の接触状態が弾性域内にあるときの摩擦係数の値は、表面粗さの形状パラメータ σ や r の値を変えることによってもコントロールできることが分かる。例えば、表面粗さ σ が小さいほど、あるいは突起の曲率半径が大きいほど H の値は低下し、摩擦係数の値は大きくなる。これは表面が滑らかになるほど摩擦は大きくなることを意味している。多方の読者は、表面が粗い方が摩擦も大きいと思っていたのではあるまいか。実際には、表面はある程度粗い方が摩擦は低減するのである。図4-22はこのことを実験的に検証した例である。 σ が $1.0\mu\text{m}$ より小さくなると確かに摩擦係数は σ の値が小さいほど大きくなっていくのが分かる。固体表面に溶射などを用いて微小な粗さを付与し、摩擦をコントロールする技術はこのことを利用したものである。

11. ウェブとローラ間への空気巻き込み

ウェブの搬送速度が上昇するにしたがい、粘性によってウェブ表面およびローラ表面に貼り付いた空気がウェブとローラ間に巻き込まれる割合が増大し、摩擦特性に大きく影響するようになる。このとき、摩擦に関するアモントン-クーロンの法則は成立せず、巻き込み空気の影響を取り入れた新たな取り組みが必要となる。

図4-23は、第2章で詳しく紹介した製紙機械における高速ウェブ搬送系の例を示したものである。このような系のウェブとローラ間、および巻取時におけるウェブ層間においては、上に述べた空気巻き込みの影響が顕著に現れる。図4-24は、ウェブとローラ間において空気が巻き込まれ、薄い空気層が形成される様子をモデル的に表したもので、このようなモデルをフォイル軸受モデルと呼ぶ。以下に、このモデルの基本となる流体の粘性法則と流体潤滑の原理について述べる。

フォイル軸受モデル

12. 流体の粘性法則

流体の粘性作用については第3章5節でも述べておいたが、ここではトライボロジーの観点からさらに詳しい説明を加えたい。

流体潤滑の原理

流体潤滑の原理を理解するためには、まず流体の重要な性質である粘性について知る必要がある。そこで、図4-25に示す微小距離 Δy だけ離れた平行平板を考える。ただし、以後、表面粗さは流体膜厚さに比べて微小で、表面は近似的に滑らかであるとする。

平行平板間は流体で満たされ、 $y=0$ の面は静止し、 $y=\Delta y$ の面は、微小平均速度 Δu で Δt 秒の間 x 方向に滑った状態を考える。流体は、図のように角度 $\Delta \gamma$ だけ直線状にずれるとすると、微小角 $\Delta \gamma$ に関して式(57)の近似が成り立つ。

$$\Delta \gamma \cong \tan(\Delta \gamma) = \frac{\Delta u \Delta t}{\Delta y} \quad \dots\dots(57)$$

図4-23 製紙機械における高速ウェブ搬送系の例

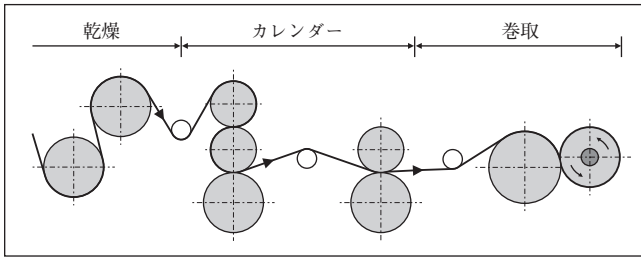
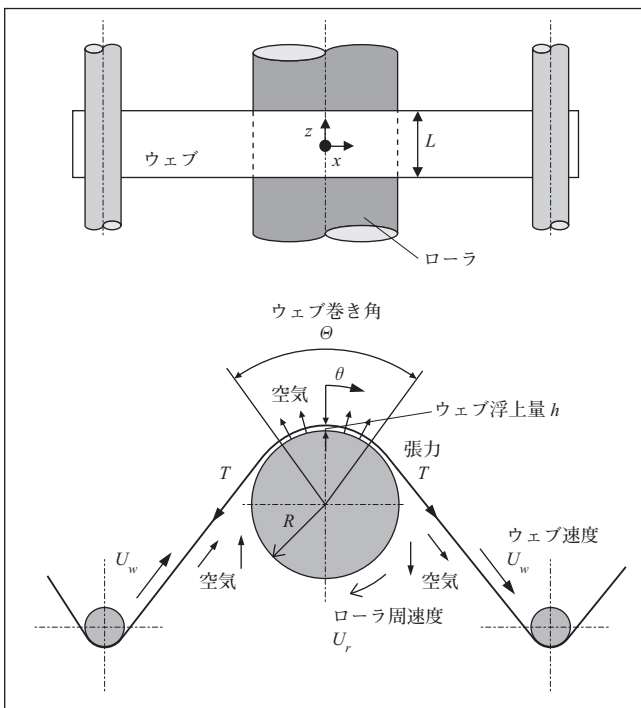


図4-24 ウェブ搬送系における空気巻き込みの影響 (フォイル軸受モデル)



KEYWORDS

式(57)より、

$$\frac{\Delta \gamma}{\Delta t} = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad \dots\dots(58)$$

となり、式(58)の両辺の無限小の極限をとると、微分の定義から次式が得られる。

$$\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{du}{dy} \quad \dots\dots(59)$$

式(59)で与えられる $\dot{\gamma}$ を剪断ひずみ速度と呼ぶ。

ここで、 $y = \Delta y$ 面を滑らせるのに必要な力を F 、板の面積を A とすると、壁面剪断応力 τ は、次式によって定義される。

剪断ひずみ速度