

抄紙機リールの性能向上化

Quality Improvement for Paper Machine Reel

三原製作所 三小田 収*¹ 渡辺 徹*²
技術本部 河野和清*³ 谷本光史*⁴

オフセット輪転機での紙切れ及び枠替え失敗の大半は、抄紙機・リール枠替え直後のロール内部応力が最も不適正に起る所と関連していることが報告されている。本報ではセントトルク機構あり、なしの下、非線形圧縮特性、紙幅方向のニップ圧変化等を考慮した内部応力解析手法を開発し、理論と実際が良く一致することが確認された。この手法により新しい水平スライド方式（TNT 巻取り）と従来のプライマリセカンダリ受け渡し方式が解析された結果、スライド方式が約 20% 内部応力が緩和され、層間のすべり発生も安全域であることが確認された。

The characteristics of the wound rolls significantly influence to the internal stress distribution. A new method of numerical simulation for predicting the in-roll stress was developed with experimental verifications, where in the effects of the axial nip distribution, center torque and tension loss are taken into account. The performance of two types of reels was demonstrated. In an evaluation of the internal stresses, it was learned that the new type of reel has a better winding profile which results in a 20% reduction in the maximum shearing stress.

1. ま え が き

抄紙工程の効率向上のニーズに対応して、巻取りロールの大径化及び面長の広幅化の要求が高まっている。このような条件の下で欠陥のない巻取りロールとするためには、巻きプロファイルの適正化が重要である。

これまで、巻取りロールの内部応力を精度良く求めるために、巻取り紙の力学的異方性や非線形圧縮特性などを考慮した内部応力予測理論が発表されている⁽¹⁾。

しかしながら、予測精度の検証を小径ロールを用いて行ったものが多く、また、実機評価で重要となる紙幅方向の巻き固さプロファイルや、その運転条件との関連について言及したものはほとんど見当たらない。

本報では、紙の異方性・非線形圧縮特性、ニップ部の張力変化に加え、紙幅方向のニップ圧分布及びロールの曲げ変形による内部応力の変化を考慮した巻取りロールの内部応力予測手法を開発し、実機並みのロールを用いた試験により開発理論の有効性の検証を行った。

つぎに、これを用いて実機の巻取り状態の予測を行い、巻取り方法によるその違いを明らかにした。

2. 巻取りパラメータと解析理論

2.1 巻取りパラメータ

図1は最新の巻取機、三菱ベロイト TNT リールを示す。ここで TNT の T は巻取りロールのセントトルク及びリール入側張力を、N はドラムと巻取りロール間のニップ力を表す。

スプールストレージ上に並べられた空スプールは順次水平レール上を枠替えの際も左に送られ、常に巻取りロールとドラム間のニップ力が最適値となるようドラムが上下にコントロールされ、通常ドラム左上 45° の位置にて大径巻きをほぼ完了する。この巻取機の大きな特長として巻取りロール自重の一部がドラムにてサポートされていること及び枠替え時通常見られるプライマリからセカンダリのトランスファ機構がなく、一巻きの中でスプール端とセントトルクモータ間のクラッチ受け渡しが無いため、シンプルな機構にて非常に滑らかな巻取り内部応力が形成される。

図2に一般的なリール巻取り時の内部応力状態に影響を与える要因を示す。紙はある張力下で、ドラムで押えられた状態でスプールに巻取られる。スプールに巻取られる紙の張力は、ドラム上及びニップ下でのすべりによる摩擦力により変化する。また、リールとドラムは自重とニップ力によりたわみ変形を起すため、両ロール間の接触荷重は紙幅方向で均一でなくなり、内部応力は紙

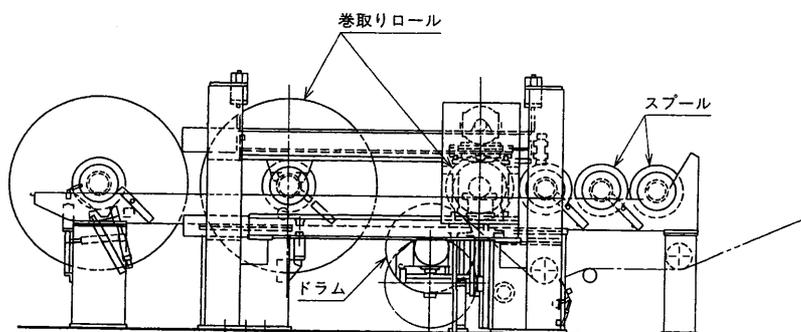


図1 最新巻取機、三菱ベロイト TNT リール プライマリからセカンダリのトランスファ機構なしの水平移動巻取機を示す。
Latest surface reel (TNT)

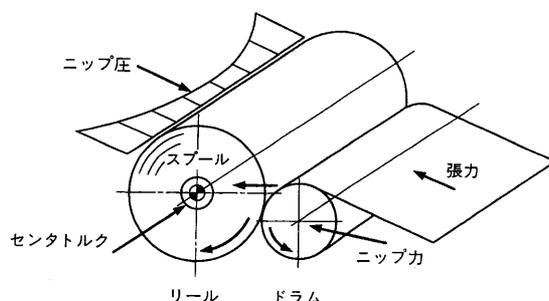


図2 巻取りロールパラメータ 巻取りロールに及ぼす制御因子を示す。
Parameter for roll control

*1 製紙・紙工機械技術部製紙機械設計課主査

*2 製紙・紙工機械技術部製紙機械設計課

*3 広島研究所紙・印刷機械研究推進室主務

*4 広島研究所紙・印刷機械研究推進室

幅方向に分布を持つことになる。このようにしてリール径の増加とともに内部応力は時々刻々変化して行く。この内部応力の変化を逐次詳細に求めることにより、ロールの巻き固さや巻き状態を推定することができる。

2.2 解析理論

巻取りロールの内部応力予測モデルは軸直角断面の二次元モデルとし、厚肉円筒理論を用いることにより、次に示す半径方向応力増分 $\Delta\sigma_r$ についての基礎式を得る。

$$r^2 \frac{d^2 \Delta\sigma_r}{dr^2} + 3r \frac{d\Delta\sigma_r}{dr} + (1 - \frac{E_\theta}{E_r}) \Delta\sigma_r = 0 \quad (1)$$

境界条件は、内層部はスプールコアとの変位適合条件で、外層側は次式で示される最外層部 ($r=r_{out}$) での巻込まれ張力釣合い条件である。

$$\Delta\sigma_r \Big|_{r=r_{out}} = \frac{T_{in}}{h} \Big|_{r=r_{out}} \quad (2)$$

ここで、 r 、 h 、 E_r 及び E_θ は、それぞれロール半径、紙厚さ、半径方向及び周方向ヤング率である。上式中の T_{in} は巻込まれ張力で、次式で表される。

$$T_{in} = T_1 - T_{loss} + T_{nit} \quad (3)$$

ここで、 T_1 はセントトルクの効果⁽²⁾を表し、ドラム上での紙のすべり摩擦特性及びセントトルクとドラムトルクの分担比 α を用いて表現できる。また、 T_{loss} は巻締めによる張力損失⁽³⁾、 T_{nit} はニップ通過時の張力増加⁽⁴⁾である。 T_1 、 T_{loss} 及び T_{nit} を次式に示す。

$$T_1 = T_0 \left(\alpha + \frac{1-\alpha}{\exp(\mu_{pd}\theta)} \right) \quad (4)$$

$$T_{loss} = -E_\theta \varepsilon_\theta = -E_\theta \frac{u}{r} \Big|_{r=r_{out}} \quad (5)$$

$$T_{nit} = \mu_{pp} N \quad (6)$$

ここで、 T_0 、 μ_{pd} 、 θ 、 u 、 N 及び μ_{pp} は、それぞれドラム前の張力、ドラムと紙の動摩擦係数、ドラム巻き角、半径方向変位、ニップ線圧及び紙層間の動摩擦係数である。

巻取り紙の積層方向圧縮特性は強い非線形性を示すため、半径方向ヤング率 E_r は次に示す半径方向応力 σ_r の関数として次式で定義する。

$$E_r = a_0 + a_2 \sigma_r^2 + a_4 \sigma_r^4 \quad (7)$$

式(7)において、係数 a_0 、 a_2 、 a_4 は積層紙の圧縮試験から定めることができる。

以上を差分法を用いて離散化して解くことにより、各巻取り状態 i ステップでの半径方向応力増分 $\Delta\sigma_r(i)$ が得られるので、 i ステップでの半径方向応力 $\sigma_r(i)$ は次式に示す応力増分の重ね合せにより求めることができる。

$$\sigma_r(i) = \sigma_r(i-1) + \Delta\sigma_r(i) \quad (8)$$

この手順を最終層まで繰返すことにより、最終巻取り時の半径方向応力分布が得られる。

3. 巻取り試験による解析精度検証

図3に、パイロット試験機にて実施された坪量 43 g/m^2 の新聞巻取り紙層間圧力の実測値と解析値及び周方向応力の解析値例を示す。

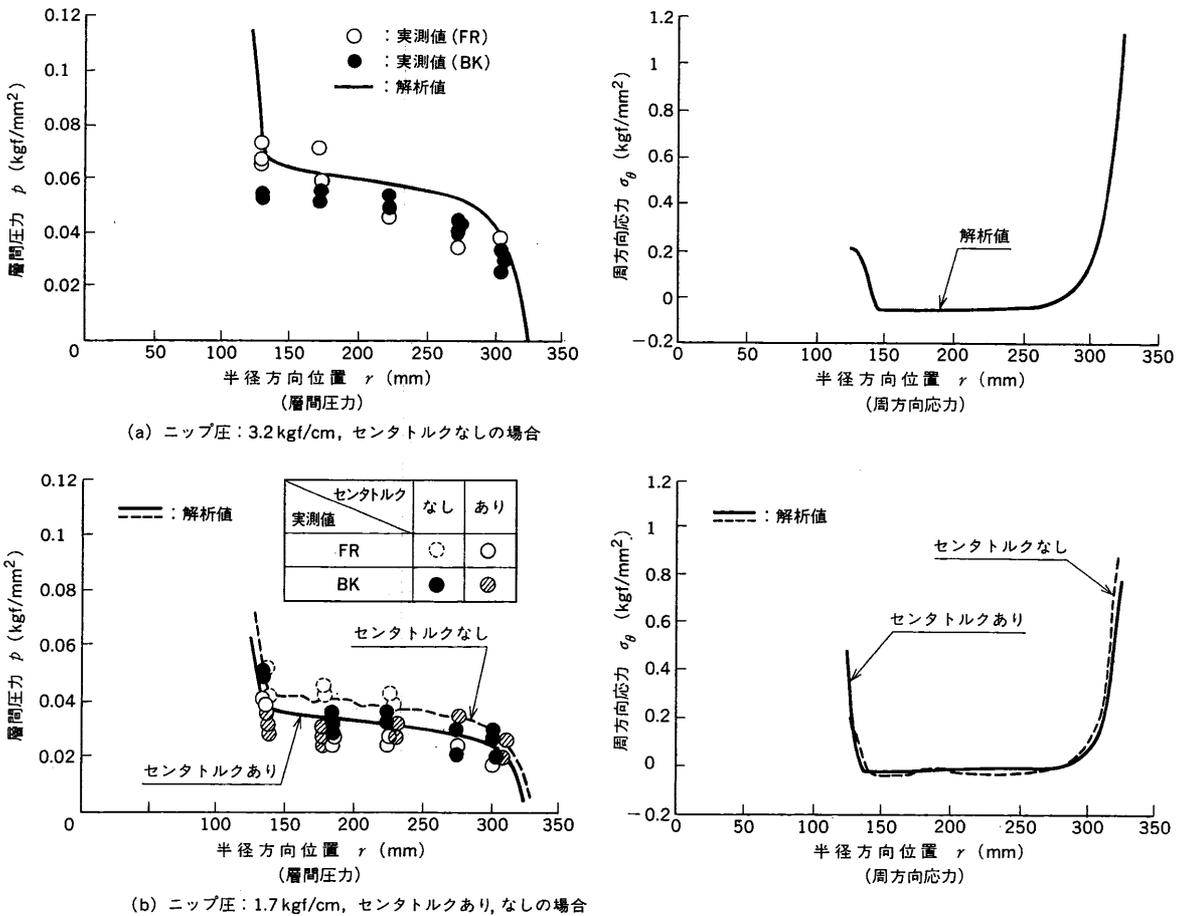


図3 層間圧力と周方向応力の実測値と解析値 坪量 43 g/m^2 新聞巻取り紙での実測と解析結果を示す。 Pressure between layers and circumferential stress in actual and simulation status

示す。

図中実測値のFR及びBKはそれぞれロールの操作側及び駆動側端部を示す。層間圧力はニップ圧を高くするほど、またセントトルクを加える方が高くなる。実測値と解析値は良く合っており、本手法が内部応力予測手法として有効であることが分かる。セントトルクを加えることによりニップ圧を高めることなく巻き固さを固くすることができる。この例では、セントトルクはニップ圧0.54 kgf/cmと等価である。

4. 実機巻取りロールのプロファイル

ここでは二つのタイプのロールを対象に、巻取り状態を評価する。

- (1) 水平スライド方式 (TNT方式, T:トルク, N:ニップ, T:テンション)

スプールは枠替えから巻終わりまで水平レール上を移動する。ニップ圧の調整は、ドラムの昇降で行う。また、スプールのセントトルクコントロールを行うことができる。

- (2) プライマリセカンダリ受け渡し方式 (従来方式)

ドラム上で枠替えを行ったスプールはプライマリアームで加圧されながら下降し、ドラムと水平位置でセカンダリアームに受け渡され最大径まで巻かれる。

巻取り状態の判定のため、前述の理論解析手法に加え、次に示す紙幅方向のニップ圧分布とロール曲げ変形による内部応力変化を考慮する。

- ① スプールとドラムのたわみによる紙幅方向のニップ圧分布

図4に示すように、ロールの自重、ニップ圧及び支持方法を考慮した有限要素法はりモデルを考える。これにより得られた接触圧は、紙幅方向中央部と端部の内部応力計算を行うときのニップ圧として各形式のロール条件に適用する。

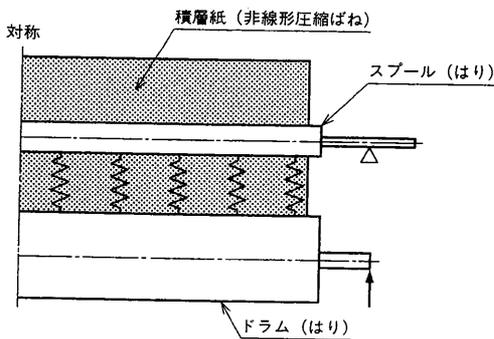


図4 ニップ圧分布を求めるはりモデル 紙幅方向のニップ圧分布を考慮するはりモデルを示す。 Beam model for nip distribution in cross direction

- ② 巻取りロール曲げ変形によるせん断応力⁽⁵⁾

最大に巻いたとき、自重とニップ圧に起因する曲げ変形により巻取りロール内部にせん断応力 $\tau_{r\theta}$ が発生し、この値が限界値を超えると層間すべりを生じて、しわや破断につながる可能性がある。層間圧力とせん断応力によるすべり発生条件は、次式となる。

$$p \leq \frac{\tau_{r\theta}}{\mu_{pp}} = p^* \tag{9}$$

ここで、右辺をすべり限界圧力 p^* と定義する。このせん断応力を三次元有限要素法を用いて求める。2章で述べたように積層

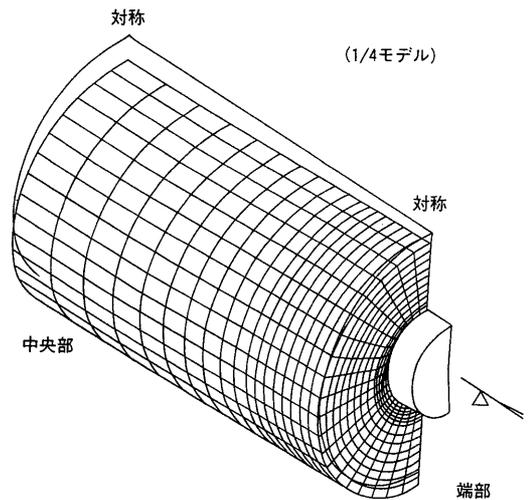
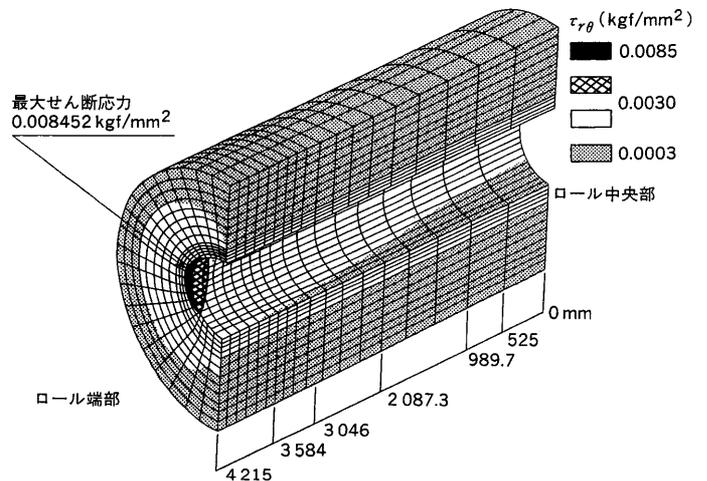
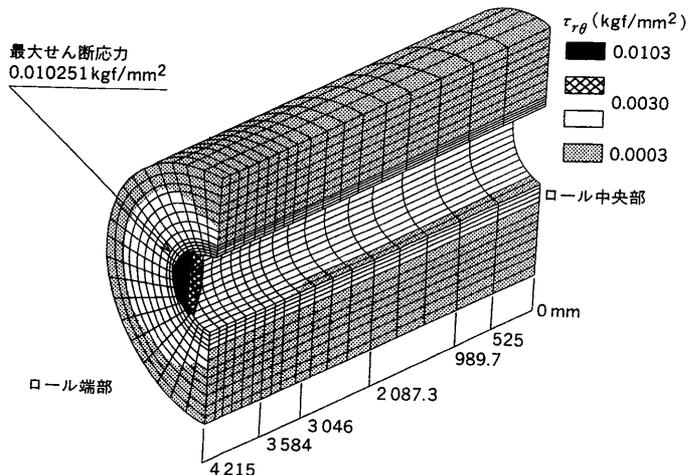


図5 せん断応力を求める三次元モデル ロール曲げ変形による内部応力変化を求めるための分割モデルを示す。 3D model for internal shearing distribution



(a) 水平スライド方式



(b) プライマリセカンダリ受け渡し方式

図6 巻取りロールのせん断応力分布解析結果 (φ2800mm) Shear stress in φ2800 mm roll

紙の半径方向ヤング率は半径方向応力の関数として三次元有限要素モデル (図5参照) に用い、半径方向にヤング率の異なる不均質体として扱う。

5. 結 果

図6に、三次元有限要素法解析で得られた、巻取りロールのせん断応力分布を示す。外力は自重とニップ圧、巻取り径は $\phi 2800$ mmである。せん断応力の最大値はロール端部のスプール表面近傍で生じ、これはしわや破断が発生しやすい領域に対応しており、水平スライド方式が約20%の応力軽減を与える。また、同様の解析によれば、リールを大径化、広幅化するとこのせん断応力は大きくなる。一方、実運転においてもこのような状況下でしわや破断がより発生しやすくなることから、このせん断応力が層間すべりの主要原因であると推定される。

次に図7に巻取りロールの内部応力計算結果をロール端部のすべり限界圧力と合せて示す。ここでは、スプール近傍に着目する。これから、層間圧力は全領域ですべり限界圧力以上であり、すべりを生じることはない。

しかしながら、実機では加減速トルクによるせん断応力も加わること、ニップが必ずしも設定どおりに加わらない場合も考えられること、及び紙の摩擦係数など局部的変化もあることなどを考慮すると、十分な余裕が必要であり、水平スライド方式の方が余裕が大きい。

一方、損紙の多いといわれる巻始めから数百mで比較すると、水平スライド方式の方がより均一なプロファイルとなっている。これは、同方式では自重方向が大きく変化しないこと、及びセントトルクを加えることにより、特に巻始めのニップ圧を下げられることから、ニップ圧分布がより均一であることによる。

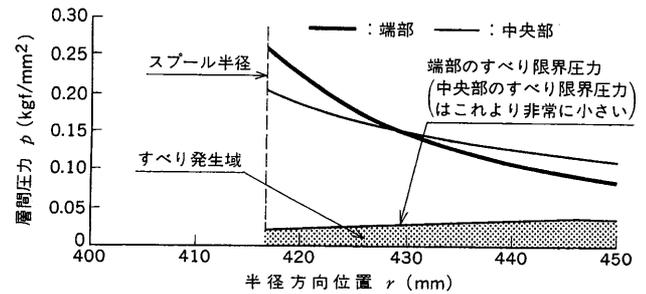
6. あ と が き

本報では、理論と実験検討を行い、以下の結果を得た。

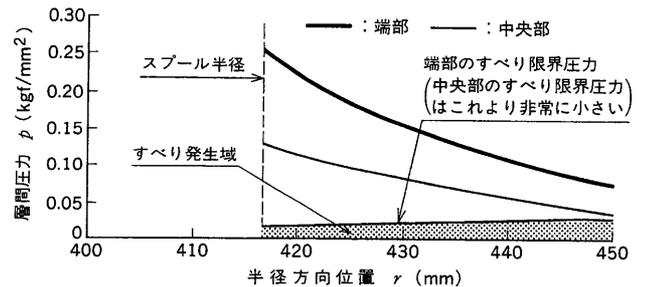
- (1) 紙の異方向性・非線形圧縮特性、ニップ部の張力変化及び紙幅方向のニップ圧分布を考慮した巻取りロールの内部応力予測

参 考 文 献

- (1) Hakiel, Z., Nonlinear Model for Wound Roll Stresses, Tappi Journal Vol.70 No.5 (1987) p.113~117
- (2) Cai, N., The Effect of Nip Roll Compliancy upon Center and Surface Winding, Oklahoma State Univ. M. S. Thesis (1992)
- (3) Good, J. K. and Pfeiffer, J. D., Losses in Wound-on Tension in the Centerwinding of Wound Rolls, ASME AMD-Vol.149, Web Handling (1992) p.1~12
- (4) Good, J. K. and Wu, Z., The Mechanism of Nip-Induced Tension in Wound Rolls, ASME Journal of Applied Mechanics Vol.60 (1993) p.942~947
- (5) Smith, O. and Bagnato, L., Relationship of the Paper Machine Reel to the Winding Process, Tappi Finishing and Converting Conference in New Orleans (1993)



(a) 水平スライド方式



(a) プライマリセカンダリ受け渡し方法

図7 巻取りロール内部応力計算結果 リールスプール周りの内部応力解析結果を示す。
Internal stress simulation around reel spool

手法を開発し、パイロット試験結果との照合により、本手法が良好な精度を有することを確認した。

- (2) 巻取りロールの自重とニップ圧により発生するロール内部のせん断応力を考慮することにより、しわや破断の発生に対する安全性評価の指針を示した。
- (3) 水平スライド方式とプライマリセカンダリ方式の二つのリール方式の内部応力特性を比較し、前者の方がしわや破断の発生に対する安全性が高いことを示した。