スーパーカレンダーの最近の技術展望

石川島播磨重工業㈱ 神宮路 正, 甲斐 睦了

Recent technical view of supercalender

Tadashi Jinguji and Mutsunori Kai
Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

The supercalender is the machine which follows the paper coating and paper making processes and functions to give a paper high gloss and a smooth surface.

In the preceding stages of coating and paper machines, a hybrid twin wire machine and high fidelity blade coating machine were developed by which productivity, runnability and quality of product were much improved.

Attempts have been made to improve supercalender operating speed and runnability, even though no fundamental problems have been solved and no basic concepts of design have been changed over the last few decades.

However, from the view point of technical research and development, it can be said we are at the stage that the development procedures and methods have only just been established and we are starting to accumulate technical data and information.

One of the hurdles to be overcome is how to find a quantitative measure for the gloss, since this is really a human sense or feeling and yet is one of the major decisive factors for the quality of the product.

The hardware to control the gloss is there.

To combine this "hardware" and "human sensing" capability, fuzzy theory should be introduced into the design concept.

Following is a review of the supercalender research and development history focusing on how it responded to preceding process improvements for machine speed and productivity.

In order to meet high speed and efficient productivity in the ongoing processes, the supercalender has yet to resolve the following issues :

1. To speed up to the limit where elastic rolls tolerate.
2. To develop a technology for continuous operation.
3. To minimize elastic roll change time.

The auto-crown control roll improved the product quality remarkably.

The soft winding however also resulted in improved quality and more overall efficient productivity since this soft winding permitted technical innovation for the following processes of the finish winder.

Keywords : Supercalender, Vibration, Vertical unwinder

1. はじめに

スーパーカレンダーは抄紙工程または塗工工程の後

に続く仕上工程の1つで、その機能は紙に平滑性と光沢を与えることにある。前工程の抄紙および塗工においては、ハイブリットツインワイヤー、高性能プレー

ドクターの出現といった技術革新により、生産性、操業性、信頼性および製品品質が大幅に向上したが、スーパーカレンダーに関しては、ここ数10年設計・操業の基本的なコンセプトは変わらず（基本的な問題はなにも解決されていない。）その枠の中で高速化、操業性の向上が図られて来た。しかし品質向上という観点からの技術開発はやっとその方法論をみつけ、段階的に技術蓄積をしているのが現状であろう。品質向上技術の開発の柱となるのは、光沢という官能的な判定に依存している人間的な要素をどうやって定量化するかといった問題の克服であろう。光沢コントロールのハードは開発されているので、それを結合する技術はファジ理論をよりどころとした制御コンセプトの確立であろう。従ってここでは、前工程の高速化・生産性の向上にスーパーカレンダーがどう対応して来たか、そのあたりに焦点をしばって技術開発の歴史をふりかえてみたい。

前工程の高速化・生産向上に対応するためには、第1にレイアウトとスーパーカレンダーを弾性ロールが許容するぎりぎりまでスピードアップをはかることであり、次には前工程なみに連続運転できるようにする技術開発を行うこと。さらにはスーパーカレンダー固有の問題である頻発に発生するロール交換の時間をいかに短縮するかにある。スーパーカレンダーにおける品質向上は自動クラウンコントロールの出現によって

大幅に図られたが、ここでは品質と歩留向上に果した、ソフトワインディングについてもふれてみたい。ソフトワインディングによってはじめて後工程である巻取工程（仕上ワインダーの実用化）の技術革新を誘発したものと考えるからである。

2. 操業面の改善

2.1 レイアウトについて

従来のスーパーカレンダーのレイアウトは、図1のごとくアンワインダーとワインダーが同じ側に配置されるC型がほとんどである。このタイプは省スペース型ではあるが、巻取りを完了したロールの後工程への搬送の面から工場内の機械配置に苦慮しているのが実状である。特に広幅で大径ロールになると重量も40t前後となり、クレーン操作する上で安全上の問題が指摘されている。機械の配置によっては、ワインダーで巻取ったロールをスーパーカレンダーの頭上を越えて後工程（仕上ワインダー）へ搬送しなければならないこともある。

当社ではこの問題の解決を図るため、長年に渡って開発を進めた結果、図2のようなU型のレイアウト（特許申請済）を考案した。

このU型スーパーカレンダーが国内においてすでに10数台新規設備に採用されるに至り、ここにその特長を紹介する。

図1 C型スーパーカレンダー

図2 U型スーパーカレンダー

写真1 U型スーパーカレンダー全景

- ① アンワインダー、ワインダーがスーパーカレンダーを挟んで、左右に配置されているので後工程への紙ロールのハンドリングが容易にできるようになった。
- ② 抄紙機、コーター、スーパーカレンダー、そして仕上ワインダー迄一貫した流れのレイアウトが可能となった。
- ③ 2 FLで集中操業管理ができるので、オペレータの作業条件が良くなった。これによって従来2台のスーパーカレンダーを4人で操作していたものを、1人減らして3人でできるようになった。
- ④ 1 FLの空いたスペースを有効に活用できる。

1例として全幅ワインダーを2Fに設置して他のワインダーを1Fに設置することも可能で、1ラインで2工程分の処理機能を持たせることもできるようになり応用範囲が広まった。

- ⑤ スーパーカレンダー操作に必要な油圧、空気それに温水装置などの補機関係のレイアウトが容易になった。

2.2 アンワインダー＆ワインダーでの自動紙継ぎ

スーパーカレンダーの稼働率を上げる有効な手段として、アンワインダーおよびワインダーでの自動紙継ぎがある。その中でアンワインダーについては、図3に示すようなバーチカル型アンワインダー（特許）を開発し、すでに実機に採用されている。

このアンワインダーは、従来型のシングルアンワインダーと比較してロールの枠替え時間を大幅に短縮（約1/5）できるため、スーパーカレンダーの稼働率を全体で8～10%引き上げることができる。特に従来型では人手がかかっていた広幅で大径ロールになるほどその威力が発揮できる。

稼働率のアップを逆にとらえて生産量を一定にした場合は10%程度、操業速度を下げる事が可能となるのでその分、弾性ロールの寿命を伸ばす効果がある。

図3 バーチカルアンワインダー

写真2 バーチカルアンワインダー

このアンワインダーの特徴は空スプールの搬出から新ロールのセット、紙継ぎ迄の一連の時間短縮以外に、空スプールのアンワインダーからの搬出を操業に無関係に行うことができる。クレーンがコーター用リールと共用の場合であっても、クレーンの空き待ちによる操業停止の心配がない。

このアンワインダーの開発により、後で述べるフルロールの自動ハンドリンクへの応用と道が開けるようになった。

ワインダーの自動紙継ぎについては現在実用化に向けて鋭意研究開発中であり、具体的な内容については別の機会に紹介させていただくとしてここでは省略する。

2.3 ニップ・オープン通紙

スーパーカレンダー全段に紙が通っている状態において、ロールを開放するとロールとロールの間で紙の張り、緩み現象が生じるため、開放から再度ニップ状態に戻して運転するとロール間でしわが発生する。

しわの具合によっては、弾性ロールに傷を付ける心配があるのでロールを開放した状態での通紙作業はできないという問題がある。

これはフレーム側に組み込まれているフライロールがフレームに固定されているために生じる問題である。この固定方法を変えてメインロールと同調して動くよ

うにすることで、ニップおよび開放いずれの状態でもトップロールからボトムロール迄の紙パス長を同じにして、この問題の解決を図った。

この技術はアンワインダーで紙継ぎを行った継目の部分を弾性ロール表面への傷付きを避ける上で、ロールを開放状態で通すためには不可欠なものである。

開放状態での通紙作業のネックはトップロールからボトムロール迄の紙の送り出しである。

自重状態での通紙作業では紙の送り出しの必要はないが安全性、弾性ロールへの傷付き、紙のロス等の問題があり、好ましい方法ではない。

開放状態での紙送り作業は通紙時の抵抗となるフライロールを手廻しして、上段から下段へ順に紙を送っているが、ロール幅が5mクラスになるとフライロールも重くなりメカロスが増えて大変な力仕事となる。オペレーターにとっては最もきつい仕事となる。この力仕事を解消するため、当社では通紙作業時のみフライロールを駆動させる方法を考案し、これにより通紙作業の改善を図った。

2.4 紙ロール等のハンドリングについて

コーター用リールとスーパーカレンダー用アンワインダー間、さらにスーパーカレンダー用ワインダーと仕上ワインダー用アンワインダー間のスプールと紙ロールの搬出、搬入作業は各々専用クレーンに行っているのが実状である。

しかし紙幅が5mを超える大径ロールとなると重量も40t近くとなり、クレーン操作では安全上、機械保護上限界にきている。

そこでクレーンを使用せずに別の方法でハンドリングを行うニーズが高まってきた。

先に述べたバーチカルアンワインダーの出現により、図4のような自動ハンドリングシステムを考案した。

このシステムのポイントは単にスプール、紙ロールを搬出、搬入するばかりでなく、スプールに残された残紙の処理、紙ロールの処理順序の入れ替えなどを可能にしている点である。

更にこのシステムでは集中管理も可能となり、省力化を進める上で威力を発揮できると思われる。

3. フレームの振動対策

3.1 フレームの耐震設計について

最近の我が国におけるブレードコータの顕著な傾向は高速化、広幅化であろう。

昭和50年までのコータの平均的なロール幅は3,500m/m、運転スピードも600~800m/minの間にあったが、それが50年代に入ると新設されるコータの平均幅は5,400m/m、運転速度は設計でmax 1,500m/min、実績でも平均1,000m/minを超えてきた。前工程の高速化、広幅化に対応するためにスーパーカレンダーでまず解決しなければならない課題はフレームの振動の解決であった。昭和40年代および50年代初期に設備したスーパーカレンダーを増速（平均的には600~650m/min）するとき、フレームの振動問題はすでに潜在化していた。この問題を解決するための我々の基本的な考え方は「フレームの破壊応力解析」をよりどころとした設計思想から、「振動解析」を主体とした剛性設計思想に切換えることであった。耐振を考えた剛性設計を可能にした技術は当時産業界で使用されはじめた有限要素法の応用によるフレームの剛性解析手法であった。

剛性解析のソフトはNASAで開発されたZ-PLATEをベースに、我々が計算と実測のフィードバックを繰り返すことによって改良したものである。この解析ソフトの改良と平行してフレームの要素分割法と境界条件の高精度化を図り、計算精度は向上し、設計段階で確実に耐振品質を作り込み、その予測ができるようになった。

その例を表1に示す。

特に多段スーパーカレンダーの場合、金属ロールと

表1 フレームの固有振動数の
計算値と実測値

フレームの固有振動数 (Hz)		
計算値	実測値	誤差
7.62	8.00	≒5%

図4 自動ハンドリングシステム

弾性ロールの接触部で、弾性ロールの変形を利用して紙に光沢と平滑性を与えるため、弾性ロールは振動起源源になっている。そのため弾性ロールの回転数とフレームのMD方向の固有振動数が一致すると、大きな共振現象が発生し操業時紙がばたついたり、断紙の恐れもあり、弾性ロールの損傷につながる恐れがある。

この表から計算値と実測値がかなりの精度で近似していることが分かる。

弾性ロールのベアリング現象はフレームの振動も原因の1つとなっているとも考えられるため、ますますフレームの耐振性能が重要である。

図5、6は実機(某社製)で振動問題を引き起こしてスピード・アップが不可能となったフレームの計測データと弊社のフレーム設計を示す。

図5 計測データ

図6 弊社のフレーム設計

4. 品質面の改善

4.1 ベアリングコンペンセーターについて

機械の広幅化に伴い紙の両耳部のつぶれすぎの問題が提起されている。カレンダーリングの基本は各ロール間の幅方向のニップ圧を均一にして、安定した品質を確保することであるが、この問題は幅方向、特に両端部のニップ圧の不均一が原因と考えられる。この要因となっているオーバーハング荷重のキャンセルの必要性については以前から論議されていたが、ことスーパーカレンダーにおいては長年その対策が取られずにきた。その一方で、従来からボトムやトップロールに使用されてきたクラウンコントロールロールの開発が進み、クラウン調整もゾーン毎にできるようになった。このゾーンデフレクションコントロール機能をもったロールを組み込んでつぶれすぎに対処してきた。しかしこれは根本的な解決方法ではなく、対症療法的手段と言わざるをえない。それは弾性ロールの両端部が異常圧を受けて、経時変化を引き起こして品質上の影響から比較的短時間にロール交換を行う必要が生じているからである。

なぜ両端の部分がつぶれすぎるかを立証するため、5mクラスのスーパーカレンダーでベアリング部にフライロール、軸受ハウジング、ニップカード等のオーバーハング荷重500kgが作用したモデルを想定し有限要素法により解析を実施した。

解析結果、接触部のロール幅方向の反力分布は図7に示す通り、端部にオーバーハング荷重の2.68倍もの大きな反力が発生することが判明した。一方、中央部についてはその影響をほとんど受けないことも分かった。

当然のことながら、オーバーハング荷重がなければ、これらの反力も発生しないことになる。

図7 反力分布図

図 8 ベアリングコンペセーター

写真 3 スクリュー・ナットシステム

オーバーハング荷重により、幅方向のニップ圧の均一性が失われると同時に、弾性ローラー端部に異常に大きな力が作用し、これが損傷を早めローラーの寿命を短くする要因となっている。

以上のことから、オーバーハング荷重をキャンセルさせることが幅方向のニップ圧の均一性を図るために重要な手段であると考ええる。

当社のベアリングコンペセーターシステムは図8のごとく、スクリュー・ナットシステム（写真3）の中で、軸受ハウジングを固定しているサドル（フレーム摺動面に密着する部分）のスクリュー・シャフト貫通部にエア作動によるアクチュエーターを組み込んでいる。

スクリュー・ジャッキ部に作用させて、その反力を利用してオーバーハング荷重をキャンセルさせるものである。このシステムの効果についてはすでに実機に応用し立証済である。

4.2 故障診断システムについて

故障診断システムのスーパーカレンダーへの応用として、弾性ローラー管理と製品品質の管理が上げられる。苛酷な操業条件で安定した品質を確保するためには、

弾性ローラーの寿命を事前に予測して適切な管理を行う必要がある。弾性ローラーには3つの問題がある。

- ①高周波帯域のベアリング振動
- ②ローラー表面の荒れ
- ③ローラー表面の温度ムラ

ベアリング振動については、故障診断システム（特許申請中）を用い、ローラーの振動計測により振動の周波数が求められベアリングの原因が容易に推定できる。実際にベアリング現象が発生した場合の解決手段としては、弾性ローラーの研磨方法の変更（湿式研磨から乾式研磨の検討）および弾性ローラーの品種の変更、硬度アップ等の対策が上げられる。更に弾性ローラー表面の傷が内部まで浸透していかないための適切な硬度管理も重要である。

ローラー表面の荒れについては、本システムで弾性ローラーの軸受の振動および騒音等の経時変化を把握することにより状況の認識ができる。上記の例から分かるように、この経時変化のデータを蓄積することによって、弾性ローラーの交換時期を容易に予測することが可能である。

ローラーの荒れについては、弊社の経験から間接的に本システムを適用して得られる弾性ローラーの軸受の振動、および騒音の履歴等により荒れの状況を間接的に求めることができることを確認している。

更にローラー表面の温度分布は、別に求められるローラーの厚み方向の温度分布と対応させることができ、表面温度を常時計測することでローラーの内部が発熱のため溶融の危険があるかどうかを判定できる。

故障診断システムとは、非接触センサーによる常時監視モードを付加することにより、ローラーの異常発熱による損傷寿命の管理ができる。

以上のことから、仕上げ条件等により起こるベアリングの診断とローラー交換時期予測へ故障診断システム

図 9 故障診断システム

が適用できることが分かる。

本システムは、図9のごとく最終段の弾性ロールの軸受ハウジングに振動加速度センサ、フレームにはロール表面アラサ検出器を設け、そのレベルと周波数のトレンドデータをベースに軸受、弾性ロールの交換時期等を定量的に管理することができる。更に機械のメンテナンス以外に、製品品質（光沢度、平滑度）とリンクさせて品質レベルの低下の原因を究明し品質の安定を図ることも可能である。

4.3 制御システムについて

最近のコンピューターによる集中監視制御の波は抄紙機・コーターからスーパーカレンダーへと確実に押し寄せてきている。これを可能にした要因として次のことが考えられる。

- ①紙の品質を決定する最終工程として、スーパーカレンダーは重要な位置を占めている。この品質は多数のパラメーターの複雑な関数となっているが、多年のデータ蓄積と解析からこの関数の知見が得られるようになってきた。
- ②品質に影響を与えるパラメーター及び品質自体を知る為のセンサー技術の進歩
- ③複雑な演算を可能にするコンピューターシステムに関する制御理論とハードウェア技術の進歩
- ④応答性と精度のよいアクチュエーターと機器の開発
- ⑤使い勝手のコンピューターシステムの出現

上記に関連し、その具体例の一つとしてスーパーカレンダーの重要な指標となっている光沢度について考えてみると、最近の文献¹⁾でも指摘されているように、人の視覚に訴えるいわゆる面感は光沢度プロファイル

と極めて良い相関関係にある。

従って光沢度プロファイルを制御することが今後のスーパーカレンダーに於いては重要な目標となる。一方、光沢度プロファイルは多数の要因の制御により得られるものであり、ここにファジィ推論と現代制御理論の適用が考えられる理由がある。

幸い当社では抄紙機の地合制御にファジィ制御を使ったシステムをIFCONという商品名で開発した実績があり、この経験をスーパーカレンダーの制御にも応用していきたいと考える。

ところで、断紙時等のシーケンス制御には即応性が要求されるので、シーケンスを用いるのが現実的ではあるが、シーケンスとコンピューターシステム間のデータ通信技術の進歩は、シーケンスをもその監視下におくことを可能にしているし、更にプロセスに関連したスピードを要求しないシーケンスであれば、手軽にコンピューターシステムで対処できる。

従ってITV等他の支援機器を採用することにより、中央操作室からのCRTオペレーションも夢ではない。

また操業に関連したデータのみに止まらず、紙品質・消耗品・メンテナンス関連のデータ管理も出来るようになってきており、いわゆるミルワイドシステムの一翼を担える環境が整ってきたと言える。

図10に本システムの構成を示す。

4.4 樹脂ロールのスーパーカレンダーへの適用について

スーパーカレンダー用弾性ロールも良質の弾性材（ニュースペシャルウールン、ホホワイト・コットン、フィルムマット等）の出現により高速、高ニップ操業に耐えられるようになってきたが、依然として断紙等によ

図10 制御システム

る傷の発生、内部発熱による焼損、長時間運転による表面の荒れ等の問題が残されている。

そのために再研磨された予備ロールを常時装備して、品質に影響を与えるロールとの交換という作業があるため操業率低下を招いている。

近年、ソフトカレンダーのロールとして脚光を浴びている特殊合成樹脂被覆ロールのスーパーカレンダーへの適用が論議されているが、実際にスーパーカレンダーへの使用が可能か否かについて過去2年間に渡り、実機(12段スーパーカレンダー)に樹脂ロールを下段側に2本組み込んで、ロール材の寿命、研磨周期、平滑、光沢への影響等の確認テストを実施した。

ここにテスト結果、明らかになった事実を上げてみると

- ①弾性ロールに比べ硬度が高いため、同一ニップ圧においてニップ・バンドの幅が狭くなり、紙質により光沢が5～7%低下する場合がある。
- ②条件の最も厳しいボトムロール上に使用した場合でも、ロールの傷みが少なく研磨周期は2～3ヶ月と長い。
- ③金属ロール+樹脂ロール+金属ロールの組合せにおいては使用上問題がないが、樹脂ロール同志の組合せは問題があり現状では使用が難しい。
- ④相手金属ロールの硬度が低いと塗料カス等を介して金属ロールに傷を付けることがあるので、特にボトムにクラウン・コントロール・ロールを使用する場合は操業上問題がある。

以上の事から、スーパーカレンダー全段に渡って樹脂ロールを使用することは難しく、最大でも3本が限界と考える。当面あまり平滑、光沢の高くないマット調のスーパー掛け程度が樹脂ロールの適用範囲と思われる。

5. そ の 他

以上、当社が最近力を注いでいる部分を重点に紹介した心算であるが、他に弾性ロール交換のためのスクリュウ・ナットシステム(特許)、断紙時の急速開放システム等の既在の技術以外にも当社独自の技術があるので、簡単に紹介させていただく。

(1) ソフト・ワインダー

スーパーカレンダーの後工程である仕上ワインダー(写真4)の実用化に到った背景には、ワインダーでのソフト巻き(低テンション巻取り)がある。このソフト・ワインダーはタッチロール水平移動型で巻取りロールに常時一定圧で押し付けて巻き取る方法である。

タッチロールの押し圧効果により高速運転において

写真 4 ソフトワインダー

も、エアの巻き込みが少なく、巻取りテンションを下げて巻取ることが可能となった。これによって駆動馬力の低下とともに巻きづれ、引き裂きやなわじわ等の欠陥が減少し、損紙率もそれに伴い減少した。巻き姿が大幅に改善されたことで後工程での処理が容易となった。

(2) 中間温水ロール

温水ロールについては一般に幅方向のロール表面の温度差が5℃以上出ると品質に影響があると言われていた。当社ではロール表面の温度分布を均一に保つため、ロール内部にディスプレイサを挿入し、シェルとディスプレイサの間に温水を通して加熱するロールと、シェルにドリルド加工してそこに温水を通すトライパス・ロールの2種類のロールを採用している。

一般的に使用されているディスプレイサ型は温水がワンパスであるため、温度差を厳しくすることに比例して給水量を増す必要がある。一方、トライパスロールは3～4本のトライパスが可能であり、同一給水量で温度差を少なく押えることができる。したがって広幅、高速用向けである。

(3) ニップ圧制御

加減速操業を繰り返すスーパーカレンダーにおいては、加減速時の品質の確保が製品の歩溜りを向上させるキーポイントになっている。

加減速時と定常運転時の品質の差をなくすため、オペレーターは光沢度計を見ながら手動圧力調整を行っているのが実状である。

この不具合を解消するために、加減速時のニップ圧制御を自動化し、しかも紙質によって調整内容が自由に選択できるようなシステムを確立した。

6. む す び

この先スーパーカレンダーはどのような歴史を辿っていくのか。

以前、レジ系塗料の開発により多段スーパーカレンダーは必要なくなる日が来るのではないかと言われながらも、依然として弾性ロールを使用するスーパーカレンダーそのもので何等基本的に変っていない。

今後、新しい塗料の開発等により、カレンダーリングそのものが変わっていくか全く予測できないが、今日明かなことはスーパーカレンダーが抱えている問題の現実的な対応であろう。

抄紙機、コーターの操業速度は今後も着実に上昇していく中で、スーパーカレンダーについては稼働率がアップしてきたとは言え、まだまだ不十分で、製品によってはコーター1系列にスーパーカレンダーが3台設置されている例もある。

操業サイドからの究極のスーパーカレンダーとは、機械を停止させずに連続操業ができることであろう。

これは偏に弾性ロール用の素材開発に係っていると言っても過言ではなく、スーパーカレンダー関係者の共通した認識であろう。

この素材開発は難しい課題であるが、我が国・高分子業界のレベルからみて紆余曲折はあるにしろ必ずや解決されると思えてならない。

その間、我々としては常に稼働率を上げるための創意工夫と開発努力が必要である。とりわけワインダーでの自動枠替え、弾性ロール交換時間の短縮等を目標に引続き研究・開発を続けていく所存である。

引用文献

- 1) 紙パ技協誌 44 (10), 1092 (1990)
- 2) 紙パ技協誌 39 (12), 1101 (1985)
- 3) 紙パ技協誌 42 (9), 833 (1988)