乾燥工程における紙の寸法安定性の改善（第2報）

—動的拘束乾燥による収縮とカール特性—

三菱重工業株式会社 広島研究所 久野廣明, 蓮池牧雄, 真田 晃, 横尾和俊
三菱重工業株式会社 紙・印刷機械事業部 大平和仁

Improvement of Dimensional Stability of Paper in a Drying Process (Second Report)

—Shrinkage and Curl Characteristics under Dynamic Restraint Drying—

Hiroaki Kuno, Makio Hasuike

Akira Sanada and Kazutoshi Yokoo

Hiroshima Research & Development Center,
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

Kazuhito Ohhira

Paper and Printing Machinery Division,
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

久野廣明

蓮池牧雄

真田 晃

横尾和俊

大平和仁

Most of mechanical properties of paper regarding dimensional stability are determined by repetition of restraint in a drying process. In order to grasp the mechanical properties of paper in the actual paper drying process, dynamic experiments were conducted. Restraint ratio during drying remarkably affected paper shrinkage as compared with results of static experiments. 87% of restraint ratio made CD shrinkage reduce 3.4% which is 36% reduction to free drying. Also, increase of heating temperature results in more reduction of the shrinkage. Drying in an open draw section provides non-uniform CD shrinkage profile in the cross machine direction due to Poisson's effect. The edge CD shrinkage was almost same as that of free drying. It was verified by FEM analysis that the cause was due to less CD stress of the edge in the open draw section. On the other hand, curl tendency in the drying process depended on the moisture level after switched top and bottom and which side was dried first. A cross point of curvature between top side dried first and bottom side dried first coincided with that of alternated drying. This indicated that it was possible to solve a curl problem due to one side drying in a single

tier drying section.

Keywords : Dynamic restraint drying, Shrinkage, Dimensional stability, Stress profile, FEM analysis, Humidity cycle, Curl, One side drying, Alternated drying

分類：S₁ 紙の性質一般, Q₆ 紙板紙品質試験法, M₇ ドライヤー

1. 緒 言

実機抄紙機ドライヤでは、カンバスによる面圧拘束、オープンドロ部でのテンション拘束、バキュームロール上での真空拘束が連続的にかつ高速で繰り返され、紙の寸法安定性に係る性質の多くが決定される。紙の寸法安定性の改善を進めるためには、この乾燥過程の動的な挙動を定量的に再現し、このようにしてできた紙の特性を把握することが重要である。過去、拘束乾燥での紙の収縮についてはいくつかの研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾が報告されているものの、動的な乾燥モデルによる紙の収縮、カール特性については研究例がなく、抄紙機ドライヤを開発していく上では大変興味深い。本研究では抄紙機ドライヤを模擬した動的紙乾燥モデルテスト装置を製作し、カンバスによる面圧拘束と真空拘束の組み合わせによる拘束力及び拘束率と収縮率の関連を把握するとともに、静的実験との比較を行った。また、オープンドロでの乾燥は幅方向に不均一な収縮プロファイルを与えることが報告されている。動的実験によりその挙動を把握するとともに、有限要素法により乾燥過程での幅方向応力分布を解析することで、その要因を明らかにした。一方、従来の二段式ドライヤでは表裏を交互に乾燥するため、カールの問題の多くは原料系やウェットエンドにその原因があった。しかし、最近では単段式ドライヤが多く、片面乾燥のため、カールの問題を起こしやすい。そのため、カール防止には片面乾燥でのカール挙動を把握することが重要である。ここでは、動的乾燥モデルにより表裏乾燥順序や表裏乾燥負荷をかえることでカールの特徴的な挙動を明らかにした。

2. 動的モデルによる紙の拘束乾燥実験

2.1 実験方法

2.1.1 供試材料

乾燥実験に供試した湿紙サンプルは抄紙機パイロットマシン（オントップフォーマ）で機械抄きしたものを使用した。原料および供試サンプルの物性を表1に示す。湿紙サンプルの寸法は210 mm (MD) × 230 mm (CD) とし、黄銅板製の枠に固定して用いた。

2.1.2 動的乾燥実験装置

動的乾燥装置は直径200 mmのヒータを内蔵した加熱ロールと直径175 mmの真空ロールからなり、湿紙をカンバスに帯同させ、加熱ロールと真空ロール間を往復駆動できるようになっている。図1にその装置構成図を示す。湿紙は板厚0.5 mmの黄銅板製の枠に、サンプルの機械抄き方向（以下MD方向と呼ぶ）の両端を固定し、縦枠の一端をカンバスにワイヤで固定し、他端は130 N/mのテンションで引張ることができる。さらに紙の表裏を乾燥するため、加熱ロールから取出したところで反転できる構造とした。オープン

Fig.1 Continues drying test equipment

Table 1 Raw material and sheet sample properties for dynamic drying experiments

	Furnish	Freeness	Basis Weight (BD)	Sonic MD/CD ratio
Properties	NBKP : 10% LBKP : 90%	240 ml	62.4 g/m ²	1.25

ドロ部での MD 方向の拘束は湿紙の含水率が高いときは、横枠が荷重を支え、乾燥が進み、含水率が下がり収縮が始まると荷重を受けるようになっている。なお荷重の設定にあたっては、供試料を含水率 5 % 程度まで乾燥したときの単位幅当たりの乾燥収縮力 315 N/m の約 40 % に相当する荷重 130 N/m を負荷した。

2.1.3 実験条件及び方法

拘束率の高い単段式ドライヤと従来の拘束力の低い二段式ドライヤの模擬実験を行なった。実験条件は表 2 に示すとおりであるが、前者の拘束率は次式で定義し、87 % と 96 % とした。後者の場合は、真空ロールを持たないので、その拘束率を真空ロールの拘束時間を除き、50 % とした。

単段式ドライヤの拘束率 (%)

$$= \{(\textcircled{1} + \textcircled{2}) / (\textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3})\} \times 100 \quad \cdots \cdots (1)$$

二段式ドライヤの拘束率 (%)

$$= \{\textcircled{1} / (\textcircled{1} + \textcircled{3})\} \times 100 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、

①：加熱ロールにカンバスで拘束されている時間

②：真空ロールに拘束されている時間

③：オープンドロー部の通過時間

また、乾燥にあたっては、実機のドライヤシリンダ本数を考慮して、加熱ロール表面温度を 60℃ と低く設定し、繰り返し数を実機並みとした。単段式ドライヤの場合、カンバスによる面圧拘束乾燥と真空拘束乾燥を 5 回繰り返したのち、湿紙を反転し、再び面圧拘束乾燥と真空拘束乾燥を繰り返し、反転を 5 回程度行なった。一方、二段式ドライヤでは、カンバスによる

面圧拘束乾燥とオープンドロー部での表裏反転を乾燥が終了するまで繰り返した。また、動的紙乾燥シミュレーションの過程で拘束力や加熱温度の実験条件が、収縮率に及ぼす影響を調べた。条件は表 2 中にパラメータテストと記したように、拘束力は 0 から 4.6 kPa とし、加熱温度は 60 から 100℃ まで変化させた。なお実験はすべて単段式ドライヤのシミュレーションとし、拘束率は 87 % とした。

2.2 紙の乾燥収縮特性の計測

乾燥後の収縮率の測定は、第 1 報⁵⁾と同様、予め湿紙につけたピンホールの標点をマイクロノギスで測定し、求めた。また、CD 方向の収縮率分布を測定するときは、あらかじめパソコン制御により、プロッタにて CD 方向 5 mm ピッチの基準標点を湿紙の MD 方向に中心と前後 10 mm の位置 3 列にマーキングし、乾燥後、最小読み取り値 0.01 mm のデジタルスケールにルーペを取り付け、標点の中心間距離を測定した。あらかじめ、測定の読み取り誤差を調べたところ、ばらつきの標準偏差は 0.05 mm で測定基準値の 1 % 以内であった。

2.3 表裏乾燥負荷とカールの測定

供紙サンプルは新聞用紙および上質紙の 2 種類でパイロット抄紙機で抄いた湿紙を用いた。表 3 にその組成と乾燥条件を示す。実験装置は前述の動的乾燥モデルの加熱ロール直径を 600 mm、真空ロール直径を 600 mm に改造して用いた。加熱ロール上でのカンバス面圧拘束を 3 kPa、真空ロール上での拘束力を 0.5 kPa とし、加熱ロールと真空ロールの往復回数を 36 往復繰り返した後乾燥が終了するようあらかじめ、加熱ロ

Table 2 Experimental conditions for dynamic restraint drying

	Simulation test I for a single tier dryer section	Simulation test II for a two tier dryer section
Total restraint ratio	87%, 96%	50%
Vacuum restraint force	2 kPa parameter tests : 0, 1, 2 kPa	—
Dryer fabric restraint force	3.4 kPa parameter tests : 2.3, 3.4, 4.6 kPa	3.4 kPa
Surface temperature of heating roll	60℃ parameter tests : 60, 80, 100℃	60℃
Hot air temperature	60℃	60℃

Table 3 Experimental conditions for curl measurement using dynamic paper drying model

Wet sheet samples			Restraint drying conditions	
Size	250×250 mm		Total restraint ratio	87%
Grade	News	Fine Paper	Vacuum restraint force	0.5 kPa
Furnish	CTMP : 80% SW Kraft : 20%	LBKP : 90% NBKP : 10%	Dryer fabric restraint force	3 kPa
Freeness	165 ml	337 ml	Surface temperature of heating roll	68℃
Basis Weight	48 g/m ² (B. D.)	58 g/m ² (B. D.)	Repeat number	36

① Bottom side dried first

② Bottom side dried first and switched

③ Top side dried first

④ Top side dried first and switched

Fig.2 Drying test schedule

ール表面温度を 68℃ に設定した。乾燥のパターンは図 2 に示す 4 通りとし、①、③のケースでは乾燥が完了するまで一方向の片面乾燥を継続した。②、④のケースは乾燥途中で表裏を反転し、そのときのドライネスをいろいろ変化させて乾燥し、カールを測定した。カールの測定は第 1 報と同様、MD 方向 10 mm、CD 方向 90 mm の試験片を切り出し、MD を軸とした CD カールを湿度サイクル 1 回後の測定値で示した。なお湿度サイクルは 30℃ 一定で、相対湿度を 65→35→85→65% とした。

3. 結果と考察

3.1 収縮特性

3.1.1 拘束率と動的乾燥収縮特性

拘束率と動的乾燥による収縮率との関係を図 3 に示す。二段式ドライヤを模擬した拘束率 50% の場合、

Fig.3 CD shrinkage vs. restraint ratio under dynamic dryer simulation

加熱ロール上での面圧拘束力および真空拘束力はそれぞれ 3.4 kPa, 2 kPa と拘束には十分な値であったが、CD 収縮率は静的な無拘束乾燥の収縮率の 23% 減に相当する 4.1% となり、拘束の効果が小さい。一方、単段式ドライヤを模擬した拘束率 87% のケースでは、CD 収縮率は無拘束の 36% 減に相当する 3.4%、拘束率を 96% に上げると、57% 減の 2.3% となり、拘束の効果が認められた。しかしまだ、静的なカンバス面圧拘束の場合⁵⁾に比べ、動的なモデルでは拘束の効果が大きく低下している。この理由は、拘束された加熱ロール上では、カンバスの通気抵抗により蒸発が抑制され、紙の温度上昇に大半のエネルギーが消費されるため、収縮がおきにくいこと、一方 CD 方向の拘束がないオープンドロ部で蒸発が進むので、ここで大半の収縮が起こるためと考えられる。このように CD 収縮率はドライヤ配置から決まる拘束率に大きく影響を受けることがわかった。しかし一方、MD 収縮率は、いずれ場合も 0.4% 以下となり、前報で報告した静的なテンション拘束の結果と大差ない値となった。これは、乾燥が進展し、MD 方向に収縮が始まると、130 N

Fig. 4 Relationship between shrinkage and restraint force and temperature under dynamic restraint drying

/mのテンションが乾燥の完了まで常にかかるため、MDの収縮が抑制されたことによると考えられる。

3.1.2 拘束力および加熱温度の影響

拘束力と加熱温度の影響について、実験結果を図4に示す。真空拘束力やカンバス面圧拘束力の増加でCD収縮率は低くなるが、その程度は小さい。真空拘束の場合、1 kPa以上で、CD収縮率は3.4%ではほぼ一定となる。またカンバス面圧拘束の場合、3 kPa以上でCD収縮率はいくらか減少する傾向が認められる。一方、加熱表面温度を60℃から100℃に上げると、CD収縮率は3.4%から2%までかなり改善する。これは加熱温度が上がったことで、紙温度が上昇し、表面での蒸気分圧が高くなり、カンバスで拘束された加熱ロール上で乾燥する割合が増えたためと考えられる。

3.1.3 幅方向収縮特性

いままでの結果から、乾燥収縮率はオープンドロー部での拘束状態の影響を受けることがわかってきた。オープンドロー部ではMD方向にテンションが作用すると、ポアソン効果により湿紙のCD方向の応力状態が不均一となり、そのため乾燥収縮率はCD方向に変化すると考えられる。G. Wedelは実機ドライヤにおける幅方向の引張り破断伸びの特性と対応づけて、CD収縮率が幅方向に変化していることを報告⁽⁶⁾⁽⁷⁾している。図5は動的モデルで乾燥した紙のCD方向収縮率分布である。両端部では収縮率が高く、中央部にいくにしたがって低くなる凹型の収縮プロファイルを示す。紙の寸法安定性を改善するためには、CD方向に均一な収縮率分布にすることが重要である。この原因

を探るため、乾燥過程での紙のCD応力状態の理論的な検討を行った。木村⁽⁸⁾はオープンドロー部での湿紙の力学的状態を、両端部の横方向変形が拘束されているショートスパン引張り状態であると仮定し、このときの幅方向の応力分布を求めている。それによれば両端部のCD応力は中央部に比べ低くなり、横方向の収縮拘束がなくなること、一方、そのプロファイルはオープンドロー部のアスペクト比（オープンドロー長さに対する紙幅の比）に影響され、アスペクト比が大きいが、紙の幅方向の諸特性の均一性向上に対して望ましいと報告している。本研究では、紙の乾燥過程のシミュレーションを行い、ドライヤシリンダ→オープンドロー→真空ロール→オープンドローの乾燥工程を有限要素法にて繰り返し計算し、乾燥過程の応力分布を解析した。計算モデルを図6に示す。カンバス及び真空により拘束されたドライヤシリンダと真空ロール上での平衡方程式はCD方向一次元でつぎのように

Fig. 5 CD shrinkage profile in the cross machine direction

Fig. 6 A model for calculation of CD stress of paper during drying

Fig. 7 Calculated CD stress profile in the open draw section

表わせる。

$$\frac{\delta \Delta \sigma}{\delta x} + \Delta f - \Delta g = 0 \quad \dots\dots(3)$$

ここで、

f: 収縮力

g: 摩擦力

$\Delta \sigma = D (\Delta \varepsilon)$: 応力増分, D: 弾性係数

$\Delta \varepsilon = \frac{\delta \Delta u}{\delta x}$: 歪み増分,

Δu : 変位増分

また、オープンドロー部では二次元モデルとし、応力増分は乾燥での収縮歪みを考慮して次のように表わす。

$$\Delta \sigma = D (\Delta \varepsilon - \Delta \bar{\varepsilon}) \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $\Delta \bar{\varepsilon}$: 乾燥による収縮歪み増分
ポテンシャルエネルギー Π はつぎのようになる。

$$\Pi = \iint (\Delta \varepsilon - \Delta \bar{\varepsilon}) \frac{1}{2} (\sigma_0 + \Delta \sigma) d\Omega \quad \dots\dots(5)$$

これらの式を離散化し、有限要素法にて乾燥過程の紙の応力解析を行った。なお、紙の材料特性としては、補遺に示す動的粘弾性をあらかじめ計測した結果、貯蔵弾性率は静的な弾性係数と大差なく、ここでは弾塑性体として取扱うこととし、各含水率で弾性係数などの物性値を与えるとともに、乾燥収縮力は前報で求めた値を採用した。図7にオープンドロー部でのアスペクト比の異なる単段式ドライヤ（アスペクト比:16）

Fig. 8 Curl Response to Repeated Humidity Cycle for News

Fig. 9 Curl tendency due to difference of drying procedure

および二段式ドライヤ（アスペクト比：5）について、含水率 25% 近傍でのオープンドロー部の CD 応力分布を示す。なお含水率 25% での物性値は、弾性係数

$D=0.4$ GPa, 比収縮力 $Gu=3.5$ Nm/g を用いた。この結果、アスペクト比の大きい単段式ドライヤの場合、CD 応力分布は幅方向に凸型のプロファイルとなり、

2) Fine paper grade

Fig. 10 Curl tendency due to difference of drying procedure

端部になるほどCD応力は低下するので、端部では収縮が起こるが、応力レベルが高いため、全般には収縮を抑制できるドライヤ配置であると言える。これに対して、アスペクト比の小さい二段式ドライヤの場合には、CD応力レベルは単段式ドライヤのそれに比べ小さく、そのため中央部まで収縮し易い傾向にあると推定される。

3.2 カール特性

3.2.1 表裏の乾燥負荷とカール

非接触乾燥や平板及びロール加熱乾燥とカール挙動についてはGlynnらが詳細な報告⁹⁾を行っているが、動的な挙動については研究例がみあたらない。本研究では、動的乾燥モデルを用いて、表裏の乾燥順序と乾燥面を反転するときの水分値をパラメータとして、新聞用紙の湿度サイクルに対するカールの応答を調べ、その結果を図8に示した。最初に湿紙のボトムサイドを加熱ロールに当てて乾燥した場合、そのまま片面乾燥すると、湿度サイクルに対応したカールの方向はトップサイドを内側に大きくカールする。つぎに表裏反転して片面乾燥を継続する際のドライネスを69%から59%, 53%, 47%へと変更していくと、湿度サイクルに対するカールの方向はトップサイドからボトムサイドに移行することがわかる。また反転時のドライネス59%を境にして、前後に不可逆カールは大きくなっていく。一方、最初に湿紙のトップサイドを加熱ロ

ールに当てて乾燥した場合は、全くこれとは対称的な挙動を示した。このように乾燥過程で紙を反転すると、その時のドライネスによってカールの方向は決まった挙動を呈することがわかる。

3.2.2 表裏乾燥順序の影響

表裏の乾燥順序を変えて、反転したときのドライネスを横軸に湿度1サイクル後のカール値を図示すると、新聞用紙の場合には図9、また上質紙の場合には図10のようになる。いずれの場合も表裏の乾燥順序を変えることで対称なカール特性が得られる。今、図中の交点のドライネスを W_d (%)としたとき、 $(100 - W_d)$ をクリティカル含水率と定義すると、いずれの場合もクリティカル含水率は33%から34%の範囲にある。このクリティカル含水率で表裏を反転したときのカールは、往復回数6回ごとに表裏を合計5回反転したときの表裏均等乾燥のカールとほぼ一致することがわかる。またこの時の乾燥残留歪みによる不可逆カールは新聞用紙も上質紙の場合も最小となった。このことは、紙の厚み方向に紙層が均一であれば、いずれの面から乾燥を開始してもクリティカル含水率で表裏を反転すれば、片面乾燥でもカールはゼロにできることを示唆している。一般に機械抄きの紙では厚み方向にファインなどが不均一に分布しており、今回実験に供した上質紙の場合、クリティカル含水率でのカールは、ゼロとはならずトップサイドにオフセットしている。このような

ケースでは表裏均一に乾燥してもトップサイドを内側にカールしやすい紙層構造をもつので、カールをゼロにする条件と、不可逆カールを最小にする条件を把握して乾燥を行うことが重要である。

4. 結 言

以上、乾燥過程における紙の動的な収縮挙動、幅方向収縮特性および表裏乾燥順序とカール特性を明らかにし、静的乾燥による寸法安定性挙動と対比することで、実機における紙の変形メカニズムをより詳細に説明することができた。本研究の結果から、

(1) CD 方向の乾燥収縮率はドライヤ形式から決定される拘束率に影響されるため、収縮率を抑制して寸法安定性を改善するには、拘束率や乾燥温度を上げることが有効である。

(2) オープンドロー部における幅方向の CD 応力分布から、そのアスペクト比を大きくすることで、より均一な幅方向の収縮特性が得られることが明らかになった。

(3) 片面乾燥においては、30% 強のクリティカル含水率で表裏反転乾燥すれば、両面交互乾燥と同等のカール値が得られ、そのときのカールの方向は最初に加熱する面で決定される。

など乾燥における寸法安定性改善のためのいくつかの有効な知見が得られた。今後はこれらを実機レベルで検証し、より改良された乾燥プロセスを提案していきたい。

謝 辞

おわりに、本研究を纏めるにあたり、引き続き貴重な助言とご指導を戴いた京都大学木質科学研究所川井秀一教授に深く感謝いたします。

補 遺

動的粘弾性

単段式ドライヤでは、湿紙がドライヤロールから真空ロールを通過する際、カンバスの厚みによる速度差の影響を受け、引張り歪みの発生と応力緩和、塑性歪みの蓄積が繰り返される。乾燥過程での紙の動的粘弾性は収縮特性を把握し、さらに収縮解析を行う上で必要である。

乾燥過程での湿紙の動的粘弾性特性については Htun ら¹⁰⁾¹¹⁾の手抄き紙についての報告があるが、ここでは幅 15 mm、長さ 90 mm の試験片を引張り試験機サーボバルサにクランプし、約 100℃ の熱風を当て乾燥しながら正弦波で加振し、応力 σ_0 、歪み ε_0 、及び位相差 δ を FFT アナライザで測定し、図 A 1 の波

形から、単純マクスウェルモデルと仮定した次式により、貯蔵弾性率 E' 、損失弾性率 E'' を求める。

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \cdots \cdots (\text{補 1})$$

$$E'(\omega) = \sqrt{\frac{E^*(\omega)^2}{(\tan \delta)^2 + 1}} \quad \cdots \cdots (\text{補 2})$$

$$E''(\omega) = \tan \delta \cdot E'(\omega) \quad \cdots \cdots (\text{補 3})$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\tau \omega} \quad \cdots \cdots (\text{補 4})$$

ここで、 E^* ：複素弾性率

ω ：角速度

$\tan \delta$ ：損失正切

τ ：緩和時間

図 A 2 に加振周波数 5 Hz での貯蔵弾性率 E' 、損失弾性率 E'' の測定結果を示す。貯蔵弾性率、損失弾性率とも乾燥が進行するにつれ、増加する傾向にある。含水率 40% 付近のウェットな状態での貯蔵弾性率は $E' = 1.8 \text{ GPa}$ で損失弾性率の約 10 倍、含水率 10% 付近の乾燥状態では貯蔵弾性率は $E' = 2.7 \text{ GPa}$ で損失弾性率の約 13 倍となった。一般に非晶性高分子の場合、温度が低温から高温にゆくにしたがって、ガラス状態、転移状態、ゴム状態と進み、化学構造の変化に対応して損失弾性率はそれぞれ極大値をもつこと¹²⁾が知られている。乾燥過程では温度一定での乾燥であり、明確な極大値は観察できなかったが、乾燥過程での構造変化とおもわれる小さな損失弾性率の変動が見られる。また周波数依存性について、M. Munoz ら¹³⁾は 0.3 から 50 Hz までの周波数域で手抄き乾燥紙の複素弾性率を求めているが、周波数の増加とともに貯蔵弾性率は漸増することが報告されている。一般にマクスウェルモデルにおける複素弾性率の周波数分散は図 A 3¹⁴⁾に示されるとおりで、実機で想定される 5 Hz 近傍での加振周波数域における貯蔵弾性率は静的な弾性係数

Fig. A 1 Stress vs. strain of dynamic viscoelastic model

Fig. A 2 Dynamic visco-elastic properties of paper during drying

Fig. A 3 Dynamic behavior of Maxwell model

と大差なく、実機での乾燥過程の材料物性は弾塑性体と近似して取り扱うことも可能である。

参考文献

- 1) 木島常明, 山川功: 紙の伸縮安定性に及ぼす乾燥時収縮の影響, 紙パ技協誌 32 (10) (1978)
- 2) 木島常明, 山川功: 乾燥時の収縮挙動に及ぼす叩解状態の影響, 紙パ技協誌 32 (12) (1978)
- 3) 安田強, 阿部祐司, 坂本祥: 乾燥収縮挙動とその紙物性への影響, 紙パルプ研究発表会 (1993)
- 4) S. R. Parsons, Effect of Drying Restraint on Hand-sheet Properties: Tappi J. 55 (10) (1972)
- 5) 久野廣明他: 乾燥工程における紙の寸法安定性の改善 (第1報), 紙パ技協誌 54 (6) 85-94 (2000)
- 6) G. L. Wedel, No-drawing restraint, Tappi engineering conference, (1988)
- 7) G. L. Wedel, Drying restraint in a single tier drying section, Tappi Annual Meeting (1989)
- 8) 木村実, 紙のショートスパン引張り特性について, 大蔵省印刷局研究報告 No. 64
- 9) P. Glynn, H. W. Jones, W. Galloway, : Drying Stresses and Curl in Paper, Pulp of Paper Magazine of Canada, 62 (1) (1961)
- 10) M. Htun, Changes in in-plane mechanical l. 62 (1) (1961)
- 10) M. Htun, Changes in in-plane mechanical properties during drying of handsheets, Tappi Journal vol. 67, No. 9, (1984)
- 11) M. Htun, A. de Ruvo, C. Fellers, The dynamic mechanical behavior of paper during drying, Journal of Applied Polymer Science, 30 1597 (1985)
- 12) J. D. Ferry, Viscoelastic properties of polymer, John Wiley & Sons, Inc. (1980)
- 13) M. E. Munoz, A. Santamaria, G. M. Guzman, Dynamic viscoelastic measurements of handsheet paper, Tappi Journal, May 1990.
- 14) 村上謙吉, レオロジー基礎論, 産業図書 (受理: '99. 10. 15)

乾燥工程における紙の寸法安定性の改善（第2報）

—動的拘束乾燥による収縮とカール特性—

三菱重工業株式会社 広島研究所 久野廣明, 蓮池牧雄, 真田 晃, 横尾和俊
 三菱重工業株式会社 紙・印刷機械事業部 大平和仁

実機ドライヤでは、カンバスによる面圧拘束、オープンドロ部でのテンション拘束、バキュームロール上での真空拘束が連続的にかつ高速で繰り返されることにより、紙の寸法安定性に係る性質の多くが決定される。本研究では実機の乾燥工程を模擬した動的拘束乾燥実験装置を製作し、各拘束の組み合わせによる拘束力および拘束率と乾燥収縮率の関連を把握するとともに、表裏乾燥順序や表裏乾燥負荷をかえることでカールの特徴的な挙動を明かにした。乾燥過程の拘束率と加熱温度は収縮率に著しい影響を与え、機械抄きの紙を使った実験では、拘束率が87%のときのCD収縮率は、無拘束乾燥と比較して36%減の3.4%となり、また加熱表面温度を60℃から100℃に上げることで、CD収縮率を2%まで低減できることがわかった。一方、オープンドロ部での乾燥は幅方向に不均一な収縮プロファイルを与えるが、FEMによる乾燥過程の応力解析から、その原因は端部ほど収縮に対し抗力となる応力レベルが低くなるためと考えられた。また、ドライヤ形式の主流となりつつある単段式ドライヤの場合、カールの傾向は紙の表裏を反転乾燥する際の含水率と、どちらの面から最初に乾燥するかで異なる。片面乾燥においては、クリティカル含水率と定義される33~34%近傍の含水率で表裏を反転すれば、両面交互乾燥と同等のカール値が得られることが明らかになるなど乾燥過程における寸法安定性改善のためのいくつかの有効な知見が得られた。

(本文 74 ページ)

上質紙の LCA：ライフサイクル・インベントリー

三菱製紙株式会社 総合研究所 桂 徹
 八戸工場 庭田 博章
 東海大学 工学研究科 中澤 克仁, 片山 恵一
 東京大学 生産技術研究所 坂村 博康, 安井 至

古紙パルプを含む上質紙について植林から廃棄に至るライフサイクル・インベントリーを試み、以下の結果を得た。

(1) CO₂量を化石燃料由来とバイオマス由来の排出量および木材や紙に固定された量に分けて解析することにより、CO₂排出量に対する植林や古紙の役割を明らかにすることが出来た。

(2) 紙の全ライフサイクルでの、化石燃料に由来するCO₂排出量は紙製造工程が最も多かった。SO_x排出量の場合は、チップ輸送時の排出量が最も多かった。これは、紙の製造工程では排煙脱硫装置による処理が行われているが、船舶等の輸送機関では排気の処理が行われていないことによる。

(3) 古紙パルプ配合率の影響についてシミュレーションを行った結果、配合率が増加すると、化石燃料とバイオマス由来の合計CO₂排出量は減少する傾向にあった。ただし、古紙パルプ高配合に伴う品質低下を防止する目的で、収率50%まで精製した古紙パルプを用いると、配合率が増加しても合計のCO₂排出量は減少しなかった。いずれの場合も化石燃料由来のCO₂排出量は古紙パルプ配合率と共に増加する傾向にあった。

(4) 回収した古紙の一部分をサーマルリサイクルすることにより、古紙パルプ製造に伴う化石燃料使用量の増加を抑えうることが明らかになった。

(5) 一連の検討を通じて、植林の取扱い方法、ボイラーで発生するエネルギーの配分方法、製紙用薬