紙の寸法安定性，特にカールについて (I)

十條製紙㈱ 石 黒 久三郎

Dimensional Stability and Curl of Paper (I)

Kyuzaburo Ishiguro

Jujo Paper Co., Ltd.

A large number of studies on the factors affecting the dimensional stability and curl of paper, and their mechanism have been carried out to date from the physical viewpoint, and they have given us nearly all phases of fundamental knowledge on the problem. However, arrival at a solution to curl in the mill site by applying these theoretical studies is not easy. Papermakers have tried to solve the problem and are often in a difficulty in the mill because too many factors are involved in the papermaking process, which add to the two-sidedness of the sheet. Antagonistic and/or synergistic interactions of these factors vary according to each mill depending upon the papermaking conditions employed, and these interactions sometimes lead papermaking engineers to take wrong actions. Thus, it is difficult to find a solution to curl problems.

Under these circumstances, this paper deals with theoretical studies on curl by summarizing the works of W. Gally, A. Tydeman and so on. It is imperative to understand their theories in order to find a remedy to the problem in the mill site.

This paper also introduces three reports on actual papermaking experiences on curl, and finally presents the author's own theory and proposal to eliminate the curl of paper.

Keywords : Dimensional stability • Curl

ま え が き

紙の寸法安定性，特にカールの問題は，いずれの製紙工場でも常に悩まされている問題である。

紙の寸法安定性，カールに対しては，従来からその原因，メカニズムについて，紙の物性面から深く研究が行われ，その基本的原理に関しては，既にほとんど解明しつくされていると言っても過言であるまい。

ただ，これを現実に抄紙現場に適用し，解決に当ろうとすると想像以上に困難が伴い，困惑し，途方に暮れる場合が多い。これは紙の寸法安定性，カールに関与する因子は複雑，多岐にわたり，ケース・バイ・ケースで異なり，画一性に欠け，現場におけるこれらの原因が何に起因するのか解明するのが難しいためである。そして，時として対応の方法を誤り，混乱を起す場合さえある。

本文はこれらの現状に照し，まず，紙の寸法安定性，カールに係る基本的事項を説明し，また，代表的な論文である W. Gally ら，A. Tydeman らの理論の要旨をできるだけ平易に紹介した。以上は実際に問題発生の場合，解決の糸口をどこにスポットを当て，解析すれば良いかにつながるもので，充分に理解する必要がある。

続いて参考として海外報文より，カールに対応した実際例を3例選び記載し，最後にカールに対する考え方，対処の方法等について筆者なりの考えをまとめてみた。

紙の寸法安定性，カールの問題に対し，基本的原理より，現場における具体的な方法までまとめて記した報文は今のところ見当たらない。本文はその意味で，この辺を一応網羅し，集大成したつもりだが，現場当事者に対し多少なりとも参考になれば幸甚と考える。

1. 紙の寸法安定性、カールに関する基本的事項

1.1 木材繊維の湿度による寸法変化

個々の木材繊維は湿度の変化に鋭敏で、吸放湿により寸法変化を起し、良く知られているような図1, 2¹⁾のような曲線を画く。すなわち、吸放湿による木材繊維単独の長さ方向の寸法変化は1%弱であるが、直径方向に対しては20~30%にも達し、紙の寸法安定性に対し影響を与える。ちなみに、木材繊維単独の寸法は樹種により異なるが、概略寸法は表1の通りで、これより吸放湿による木材繊維寸法変化の程度を知ることができる。

ただし、紙の場合は個々の木材繊維が交差し、ネットワーク状を形成し、互に交差する繊維間結合の面で、木材繊維の長さ方向の寸法変化、直径方向の寸法変化が相互に干渉しあい、あとで記述のごとく複雑である。

図1 木綿の湿度変化に伴う寸法変化

図2 木材単繊維の湿度変化に伴う寸法変化

表1 木材繊維の長さ寸幅

	長さ(mm)	幅 (mm)
針 葉 樹	2.0~4.5	0.02~0.07
広 葉 樹	0.8~1.8	0.01~0.05

1.2 木材繊維の湿度による水分変化

図3²⁾の関係も良く知られているが、木材繊維の湿度変化と平衡水分の関係(ただし、等温変化)を示したもので、いわゆるヒステリシス曲線を画く。

実際の紙の場合、仮に相対湿度70%で調湿する場合、放湿側から調湿する場合と、吸湿側から調湿する場合とでは、図3の影響を受け、表2は新聞用紙の場合だが両者の平衡水分に差異を生じ、紙の寸法安定性に対し影響を与える。

再び図3に戻り、まだ一度も乾燥を受けてない飽和状の木材繊維を放湿させていくと本図の曲線1をたどり絶乾状にしてから吸湿させると曲線2を画き、相対湿度100%、すなわち、繊維飽和点(繊維細胞壁が水分で飽和状になる点、木材繊維の場合28~33%程度)

図3 木綿の脱湿吸湿曲線(等温変化)

表2 種々の相対湿度における新聞用紙の平衡水分量(%)

相対湿度	吸湿による水分量	脱湿による水分量
10	—	2.8
20	—	4.9
30	6.5	6.5
40	7.2	7.9
50	8.0	9.2
60	9.0	10.4
70	10.5	11.5
80	12.2	12.7

図4 セルロースの吸湿率および膨潤率の等温曲線

まで上げ、続いて放湿させると曲線3を画く。そして任意の湿度、例えばA点より脱湿させるとABをたどり、またC点より吸湿させるとCDをたどり、曲線2, 3で囲まれたヒステリシス曲線内で平衡を保ち、その後の湿度変化により次第に本来の曲線2, 3上の平衡水分に達する。

図4³⁾はセルロースに対するものだが、図1, 2, 3を総括したもので、相対湿度と含有水分、および繊維の長さ方向、断面方向の変化が良く分かる。また、本図では相対湿度100%で、繊維飽和点が約30%であることを示している。

1.3 各種紙の平衡水分

図5⁴⁾は種々の紙を最初相対湿度35%に調湿した後、相対湿度65%に放置した時の経時と含有水分増加量との関係で、どの紙も最初は水分を急速に吸収するが、平衡水分に近づくにつれ、吸湿速度は大幅に減少する。

そして、平衡水分の高い紙ほど初期の吸湿速度が速く、短時間のうちに平衡水分の近くまで達するが、いずれの紙も真の平衡水分に達するのに長時間必要とし、ただちには平衡水分には到達しない。

図6⁵⁾は相対湿度65%のときの各種パルプの平衡水分で、傾向としてパルプが純粋になる程、同一相対湿度における平衡水分は小となる。これはヘミセルロースはセルロースより吸湿性が大なので、パルプの純度がセルロースに近づくほど、すなわち、ヘミセルロースが減少し純粋なパルプに近づく程、同一相対湿度における平衡水分は小となる。

また、紙の水分に対する添加物の影響は、普通のロジンサイズは全く影響はなく、填料は吸湿性が少ないので紙水分を減少させる傾向を有する。

1.4 紙の吸放湿速度

図7⁶⁾は相対湿度65%に調湿された紙を、それぞれ相対湿度100%, 0%の雰囲気中に放置した場合の時間経過と紙水分変化との関係で、図5の通り初期の水

図5 35% R.H. から65% R.H. までの水分吸着速度

図6 各種パルプの平衡水分

分変化は素早く行われ、特に吸湿速度の方が放湿速度より大(同一時間内における水分変化は吸湿の方が放湿の約2倍)で、その後の水分変化、すなわち、平衡水分に達するまでには吸放湿とも相当に長時間を必要とする。

図5, 7の関係より、低水分の紙を相対湿度の高い大気中に放置すれば、きわめて短時間のうちにその相対湿度に対応する平衡水分の大部分を吸湿するが、その後の吸湿で完全に平衡水分に達するには長時間を要する。

逆に、高水分の紙を低湿度の大気中に放湿させる場合も同じで、平衡水分に至る放湿の大部分は短時間のうちに終了するが、完全に平衡水分に到達するには長時間を要し、前記の通り同一時間内における水分変化は吸湿の場合の約1/2である。

実際操業の場合、低水分の紙を包装後、高湿度の雰囲気中で開包すると、たちまちに吸湿じわの発生を見ることがあるが、これは図5, 7の関係であり、逆に、高水分の紙を低湿度の雰囲気中で開包すると、同じく短

図 7 脱湿・吸湿速度の関係

時間のうちにしわ、波打ち、カール、その他紙の寸法安定性に影響を受け易いのも同じ理由である。

工場で紙水分測定の場合、リールよりサンプルをはかりびんに採り、試験室で $105 \pm 3^\circ\text{C}$ で 1～2 時間乾燥させ、水分を算出することになっているが、リールよりサンプリングの際、低水分の紙ほど、図 5, 7 の関係より短時間のうちに相当量の水分を吸湿してしまうので試験室測定水分は多目に記録され、実操業とカイ離した水分値を示す。BM 計水分値チェックのためのオンライン検定法も低水分の紙で行えば、サンプリングの方法が上記より厳密なので誤差幅は小となるが、本質的には上記と同様なので正確を期し難い（いわゆる BM 計水分チェックのためのオンライン検定の場合も、リール上の紙水分を極力高水分にシテストしないと、吸湿により測定誤差を大きくする）。

1.5 紙温度と水分の関係

図 8, 9⁷⁾は精練木綿の場合だが、相対湿度、温度と含有水分との関係で、同じ相対湿度下でも温度が高くなるにつれて水分含有率は減少する。ただし、図 9 のように高温、高温の雰囲気では逆転し、温度が高くなるほど今度は逆に水分含有率は増加する。ただし、これは精練木綿の場合で、木材繊維の場合には常温と 100°C の範囲で、すべての相対湿度のもとで温度が上昇するにつれ含有水分は減少する。従って、紙の場合は 100°C までの範囲で図 8 のごとく、ある一定の相対湿度下で紙温度が上昇すれば、含有水分は減少し、紙温度が低下すれば含有水分は増加する傾向にあると考えてよい。

図 9 のごとく精練木綿の場合、高温、高湿度下で、温度上昇につれ含有水分が増加するのは、高温、高湿度下で精練木綿のセルロース間の水素結合が破壊され、多くの水酸基（ $-\text{OH}$ 基）が遊離状となり、水分吸着に寄与するからだと言われている。

1.6 繊維間収縮と繊維内収縮

図 10⁸⁾はウェットシートが乾燥が進むにつれ、収縮していく状態を示したものである。水分率が 4 から約

図 8 精練木綿の 10～50 $^\circ\text{C}$ における等温吸湿曲線 図 9 精練木綿の 50～110 $^\circ\text{C}$ における等温吸湿曲線

1.5（水分約 60%）付近まで（AB 間）の収縮は、繊維と繊維間にある水が乾燥により減少し、水の表面張力の働きで繊維相互が接近していく現象で、いわゆる“繊維間収縮”と呼ばれ、その第一段階に相当するもので収縮率は小さく、また、水分の減少に対してもゆるやかな収縮を示す。BC 間は繊維間収縮の第二段階に当るもので、AB 間より収縮率は大きい。C 点（水分約 30%）を過ぎると収縮は急激に進行するが、これは繊維自身に含まれる水分が放湿することにより、繊維自身が収縮する現象で“繊維内収縮”と呼ばれるものである。

繊維内収縮は繊維間収縮に比べて相当に大きく、また、水分の変化に対し収縮量も著しく大きい。要するに繊維間収縮とは水の表面張力による収縮であり、繊維内収縮とは単繊維の脱膨潤により起こる収縮であり、叩解の程度でその大きさも当然異なる。

図 10 ウェットシートの水分率と収縮の関係
(ドライベース)

図 11 紙の乾燥による収縮

図 11⁹⁾ は一例だが H. Rance が作成したもので、この辺を説明したものである。

1.7 叩解と単繊維及びシート寸法変化の関係

図 12¹⁰⁾ は叩解の程度が単繊維 (SP) の寸法変化にどのように影響を与えるかを示したもので、相対湿度 100% の状況から相対湿度 25% に変化させ、放湿、及び再び吸湿させた場合の単繊維幅方向の寸法変化である。本図より叩解が進むほど放湿時の収縮は大きく、また、再吸湿させても幅方向の寸法変化は完全に回復せず、もっとも叩解した場合の回復率は 70% にすぎない。

図 13¹¹⁾ は L-BKP の手抄紙を用い、叩解と乾燥、シートの収縮の関係を示したもので、当然のことだが叩解が進むにつれて収縮率は大になる。また、収縮は保水度 (シートの細隙、自由表面等に水分がなくなった時の状態) に近い水分の所から生じている。

1.8 引張り状態で乾燥させた場合の紙の“荷重—伸び曲線”

図 14¹²⁾ は水分 65% のウェットシートに対し、幅 1 cm り 0.05~0.35 kg の荷重をかけながら乾燥させた

図 12 叩解の程度と繊維幅方向の放湿後の収縮率、及び再吸湿後の膨張率の関係

図 13 叩解原料の収縮挙動

図 14 各種張力下で乾燥した紙の荷重変形曲線

場合の“荷重—伸び”曲線で、大きな荷重をかけて乾燥させたシートの曲線は傾斜が急で、破断時の荷重は大きいが伸びは小さい。荷重を小にして乾燥させると複雑なカーブを描き、破断時の荷重は小だが伸びは大きい。

従って、破断するまでの仕事量を求めれば、荷重小（ドロー小）で乾燥した紙は、大きな荷重（ドロー大）で乾燥した紙より大きく、断紙に対する抵抗力は大きい。

図15¹³⁾はドライヤー各部で採取したサンプル（抄紙機方向）の荷重—伸び曲線だが、乾燥が進むにつれ伸びは減少していくことを示している。

1.9 緊張乾燥と寸法安定性

紙を緊張乾燥させると寸法安定性に効果があること

図 15 ドライパート各部における紙の荷重—伸び曲線（但し抄紙機方向）

は良く知られている。ウェットシートは乾燥が進むにつれ収縮するが（図10, 11参照）、何等かの方法でこの収縮を抑制しながら乾燥させることを緊張乾燥と

図 16 カンバス張力、ドローの強弱と紙の寸法変化との関係

図 17 緊張乾燥紙，無緊張乾燥紙の繰返し吸脱湿下の寸法変化

いう。図16¹⁴⁾はドライヤーにおけるカンバス張力、ドロー等を種々に変えた場合の抄紙機幅方向、抄紙機方向の収縮、及び伸びの関係を示したもので、結論としてカンバス張力を大、ドローを小にした場合、もっとも緊張乾燥的になり、ドライヤー出口の紙の収縮率は小となる。

ここで注意しなければならないことは、緊張乾燥を行い抄紙した紙は、ある期間寸法安定性に富むが、吸放湿を繰返えすと無緊張乾燥紙(自由乾燥…乾燥時ウェットシートの収縮を拘束しないで自由に乾燥させた紙)と同じような性質となる。

図17, 18¹⁵⁾がこの関係で、無緊張乾燥紙は吸放湿を繰返しても、本来のヒステリシスカーブを画き、緊張乾燥紙は最初のうちは相対湿度の変化、すなわち、吸放湿に対し寸法変化は鈍感で安定性に富むが、吸放湿を繰返すと不安定となる。

図 18 緊張乾燥紙, 無緊張乾燥紙の寸法変化率の経時安定性

緊張乾燥はドライパートのウェットサイドで行うと紙の寸法安定性に対する寄与率が大きく、1960年代より種々の考案、特許が発表されているが、具体的には次号で記述する。

ドライパート・ウェット・サイドにおける急速乾燥(高温乾燥)も、普通の乾燥に比しドライヤーシリンダー本数を減らすことが可能となり、その分だけ湿紙フリーランの個所が減少し、結果として湿紙収縮の機会が減るので、一種の緊張乾燥となるものと考ええる。

なお、ドライパート・ウェットサイドで緊張乾燥を行えば、寸法安定性が向上する理由は木島ら¹⁶⁾により研究されているが、大略次のように考える。

1) 緊張乾燥によりウェットシートは、ドライヤー表面に固定された状態で乾燥され、シートの自由収縮(特に繊維間収縮)が抑制される。

2) 従って、普通の乾燥条件なら本来繊維間結合(主として水素結合)される個所が、この束縛により結合領域に入らず、シート全体の繊維間結合が自由乾燥のときより減少する。

3) 紙の寸法安定性に関与する因子は、繊維間結合を通じ伝達されるので、全体の繊維間結合が少なくなればシートの寸法安定性は向上する。

4) ただし、吸放湿を繰返すとシートを構成する繊維も膨潤、収縮を繰返し、繊維間結合領域に入る繊維数が次第に増加し、全体の繊維間結合が増し、寸法安定性は順次悪化していく。

5) すなわち、緊張乾燥されたシートが吸放湿を繰返すと、繊維間結合が次第に再編成され、その数を増し寸法安定性を悪化させていく傾向をたどると考えられる。

図 19 カールの形状

図 20 Angular Curl 軸の説明

1.10 紙水分の種類

紙の水分はきわめて複雑で、その概要は筆者が後記文献¹⁷⁾¹⁸⁾で記したが、大略して結合水、吸着水、自由水の3種類より構成される。すなわち、

1) 結合水

紙の主原料である木材繊維の主成分であるセルロースに、単分子の型で水素結合している水分（紙水分の1～2%を占める）。

2) 吸着水

結合水の上に水分子が均一に Van der Waals 力により物理吸着している水分（紙品種により異なるが、紙水分で4～5%の範囲までのもの、従って、吸着水のネットは2～3%位）。

3) 自由水

結合水、吸着水以外の主として液状の水分。

以上のうち結合水、吸着水の吸湿は吸熱反応であり、また、この両者を放湿させるには熱エネルギーを与える必要がある。この吸放湿による熱反応はごく低水分の所で大部分が行われ、水分増加とともに減少し繊維飽和点でゼロとなる。

結合水の吸湿は瞬時に、また、吸着水の吸湿はごく短時間のうちに行われ、従って、きわめて低水分の紙は短時間のうちに吸湿し、紙の寸法安定性に影響を与える原因となる。

2. カールの表現法

現在カールの表現については、W. Gallay ら¹⁹⁾の提案によりほぼ統一されている。その提案は、

1) カール軸に対しては

MD (machine direction) : カールの軸が抄紙機方向と一致するもの。

CD (cross direction) : カールの軸が抄紙機幅方向と一致するもの。

2) カール面に対しては

TS (top side) : 表面（フェルト面）を内側にしてカールするもの。

WS (wire side) : 裏面（ワイヤー面）を内側にしてカールするもの。

従って

MDWS : 抄紙機方向を軸にしてワイヤーサイドを内側にカールするもの。

CDTS : 抄紙機幅方向を軸にしてフェルトサイドを内側にカールするもの。

と表現され、上記 MDWS, CDTS が一般的で、CDWS, MDTs は普通見られない。

以上のほか、カール軸が MD, CD 軸から外れているものがあり、W. Gallay らは抄紙機方向と正の角度の軸をもつものを“positive angular curl”, 抄紙機方向と負の軸をもつものを“negative angular curl”, と呼称し、いずれも“斜めの角度を有する正、もしくは負のカール”を意味している。図19²⁰⁾, 20²¹⁾はカールの状態を説明したものである。

3. W. Gallay らのカールに対する理論

3.1 W. gallay らのカール理論の要旨

W. Gallay らはカールに対し、詳細、かつ膨大な研究^{22), 23), 24), 25), 26)}を1950, 1960両年代にわたり行っているが、本研究が現在でもカールに対する有力な理論の根拠となっている。

W. Gallay らの研究の要旨を総括的に取りまとめると概略次の通りである。

1) カールは紙の表裏両面の繊維配向性の差異、すなわちシートの2面性が原因となり発生する。

2) カールは水分が最後に除去される面を内側にしてカールする。

3) カールの形状はスライスよりのフォーメーション（シート表裏の繊維配向性）により支配され、図19の MDWS, CDTS カールが一般的である。

4) CDTS カールをドライヤーアクションで修正するのは MDWS カールより難しい。

5) MDWS, CDWS カールはほとんど発生しない。

6) 乾燥条件により MDWS ⇌ CDTS に変化、すなわち、カール軸を90度変換させることができる。

7) 乾燥工程において表裏両面の繊維が受ける熱エ

ネルギーの多寡は、カールに対し影響を与える。

8) 紙が高密度化するとカールは発生し易い。これは繊維間結合が増加し、紙の厚さ方向に対しカール要因の伝達が容易となるためである。

9) 紙が低密度化、例えばGP 配合が大となると繊維間結合が減少し、上記 8) 項とは逆にカールが発生しにくくなる。

10) サイズのよく利いた紙は、厚さ方向の繊維間結合が不均一となり、カールを発生し易い。この場合のカールは繊維配向性の差異によるものと異質のものである。

11) スライスよりの原料流の性状により、図 19, 20 のような Angular カールが発生する場合がある。

12) 抄紙工程そのものが繊維配向性を始め、種々の不均一性を誘発させる性質を有しているものであり、これらの不均一性を減少させない限り、カールは常に発生する。また、カールに対する完全な治療法はないと言ってよい。

上記 1) 2) 項が W. Gallay らのカール理論の基本となっているので、次項以下でその要旨を説明してみる。

3.2 W. Gallay らのカールに関する実験

3.2.1 繊維の配向性について

W. Gallay らは染色パルプを配合してボンド紙(坪

図 21 紙のトップ面、ワイヤー面の繊維の配向性

量 60 g/m^2) を抄造し、27 個のサンプルに対し、その繊維配向性とカールの大きさとの相関を調べた。図 21, 22, 23, 表 3, 4 がこの結果で、特に図 21 を作成することにより、各サンプルの表裏各面における繊維数 2,000 個の配向性を、約 2 時間半で測定するように工夫した。そして 0 度 (抄紙機方向) から 90 度 (抄紙

図 22

図 23 繊維配向成分の差とカール曲率との関係

機幅方向)まで7.5度ごとに、繊維1本ずつに対しワイヤー面とトップ面とに対し、その配向性と本数を調べ図21のような極線図を作成した。

W. Gally らはこのような方法で、27枚のボンド紙サンプルに対し同様な測定を行ったが、図21はそのうちの代表的なもので、その後各種の論文に引用され大変有名なもので、カールに対するひとつの原点と言える役割を果たしてきている。

図21の極線図は実線、点線で示される2枚のサンプルの繊維配向性を調べたものだが、いずれもワイヤー面はトップ面に比べ、タテ方向(MD…machine direction)に多くの繊維が配向され、トップ面はどちらかというとランダムで異方性に富み、両サンプルとも MDWS カールを示し、実線で示された紙はカール曲率 43 (図24参照)、点線で示された紙の曲率は16で、前者の方がカールは大である。

本図ではトップサイドでは両サンプルの繊維配向性にはあまり差はないが、ワイヤーサイドでは実線の方が抄紙機方向に大きく配向しており、これよりトップ、ワイヤー両サイドにおける繊維配向性の差が大なる程、カールが大なることを示している。

W. Gally らはさらに表3、4のごとく、27枚のサンプルをカールの大きさが同程度の9グループにわけ、各グループより1個のサンプルをそれぞれ選択し、図22の代表例に示すようなトップ面、ワイヤー面における繊維の方向性とその本数を測定した。

図22 A は各方向性を有する繊維の数が100分率で示され、図22 B はこれに cosine を乗じたものである。これは各繊維の抄紙方向に対する成分(分力)を示したもので、本サンプルは全体として、ワイヤーサイドの方がトップサイドより、抄紙機方向に対する繊維

配向性の成分を多く有していることが分かる。図22 C ではその成分差をプロットしたもので、抄紙機方向から約30度まではワイヤーサイドの方が成分大、すなわち、ワイヤーサイドの方がトップサイドに対し、抄紙機方向に繊維が過剰に配向されていることが示され、抄紙機方向から約30～90度の範囲では、逆にトップ面の方が抄紙機方向に過剰に配向されていることが分かる。

すなわち、カールに対し影響を与えるトップ、ボトム両サイドの繊維配向性の差異は、ワイヤー面の抄紙機方向に配向している繊維成分の総計から、トップ面の抄紙機方向に配向している繊維成分の総計を差引くことにより求められる。W. Gally らは図23に前記グループに対し、その差とカール曲率の大きさを

表3 各サンプル・グループのカール曲率

Sample No.	Curvature MDWS Individual	Average	Group No
5	59	58	5 A
11	59		
30	57		
8	48	47	5 B
9	46		
10	46		
3	43	43	5 C
18	43		
20	43		
21	38	38	5 D
22	38		
23	39		
15	29	32	5 E
24	33		
25	33		
2	46	46	9 F
21	47		
25	45		
30	30	30	9 G
33	31		
34	30		
5	18	19	9 H
7	20		
8	19		
6	16	16	9 I
16	16		
22	16

図24 カール曲率

表 4 繊維配向性測定結果

Group	Side	0°	7½°	15°	22½°	30°	37½°	45°	52½°	60°	67½°	75°	82½°	90°
5 A	T S	218	205	183	175	163	172	170	155	152	148	152	147	146
	W S	433	388	296	214	171	151	117	94	86	77	76	76	78
5 B	T S	200	198	193	177	176	175	158	149	142	146	152	159	165
	W S	462	418	309	207	161	136	112	91	79	71	71	79	79
5 C	T S	238	227	200	180	177	160	142	145	142	142	138	147	167
	W S	437	384	288	225	191	152	114	91	78	80	75	71	75
5 D	T S	256	234	206	184	175	180	164	145	137	134	126	125	131
	W S	397	358	303	243	175	140	115	95	91	79	80	86	76
5 E	T S	242	220	197	184	169	170	151	137	149	153	148	141	139
	W S	336	344	298	216	183	151	114	102	100	96	92	95	99
5 F	T S	187	191	192	178	165	174	172	155	150	152	163	154	136
	W S	418	378	288	227	191	136	103	93	89	75	72	93	103
5 G	T S	241	243	234	212	177	165	165	144	132	118	109	120	130
	W S	407	368	284	227	197	151	105	91	83	81	85	94	87
5 H	T S	223	213	220	211	197	193	167	156	139	124	111	105	112
	W S	367	349	288	215	173	152	129	109	86	83	94	94	97
5 I	T S	354	222	199	203	196	173	154	152	145	134	118	116	129
	W S	373	334	263	199	171	160	122	110	114	98	94	103	111

注 TS: トップサイド, WS: ワイヤーサイド

図 25 乾燥条件とカール特性

注 TS: トップサイド
WS: ワイヤーサイド

プロットした。

本図は { (ワイヤー面の抄紙機方向に配向している繊維成分の合計) - (トップ面の抄紙機方向に配向している繊維成分の合計) } の値が, MDWSカールの曲率に正比例していることを示している。

本図はまた “カールは紙の表裏両面の繊維配向性の

差異, すなわち, シートの2面性が原因で発生する” という W. Gallay らのカール理論に対する有力な根拠となっているのである。

3.2.2 乾燥条件について

W. Gallay らは乾燥条件のカールに与える影響を調べるため, 繊維配向性の影響をできるだけ避けた

め、坪量 55 g/m²、晒 SP の手抄きシートを用い膨大な実験を行い、結論として“カールは水分が最後に除去される面を内側にしてカールする”という一種の法則を導いた。図 25 がこの実験の一部を紹介したものである。

また、図 26 は手抄きシートを乾燥後湿潤させ、再乾燥させカールの傾向を示したもので、詳細は省略するがすべてカールは最後に乾燥された面を内側にしてカールすることを示している。

W. Gallay らは上記のカール現象の理論を確立するため、前記の通り繊維配向性の影響を受けないように手抄きシートを使用し、引続き次のような実験を行っている。

実験は“X”、“Y”2枚の手抄きのウェットシートを重ね、圧力を加えて1枚のラミネート状のシートとし、これを乾燥後一方の面(“X”側)を湿潤、その後再び乾燥させた。

このように“X”側のみを湿潤、再乾燥させた後、再びラミネート状シートを“X”、“Y”各シートに分離し、両シートの長さ方向の伸び、収縮の大きさを測定したのである。

これは“X”、“Y”両シートを重ねたラミネート状シートを1枚の紙として考え、紙の一方の面をウェット状からドライ状に変化させ、長さの変化を測定し、この一方の面の長さの変化と、カールの大きさ(カールの曲率)との相関を見出す目的で行われたのである。

本実験の具体的な方法は、それぞれ坪量30 g/m²の手抄きのウェットシート“X”、“Y”を造り、これを重ね吸収紙を両面に置き、荷重を加えラミネート状にして1枚のシート(坪量60 g/m²)とし、次のような緊張乾燥、自由乾燥を行った。

1) ラミネート状のウェットシートをリングで挟み乾燥…緊張乾燥

2) ラミネート状のウェットシートをそのまま乾燥…自由乾燥

ウェットシートは末叩解、叩解原料で作成したので、緊張乾燥シートも末叩解、叩解原料で2種、自由乾燥シートも2種と、合計4種の乾燥ラミネート状シートを作成したことになる。

そして乾燥させた4種のラミネート状シートから、それぞれ一定寸法の試験片を切り取り、ラミネートを構成している2枚のシート“X”、“Y”のうち、巧みな方法と確認を重ね、シート“X”にのみ、湿り状態の吸収紙から水分が移行するように工夫した。

注 TS: トップサイド, WS: ワイヤーサイド

図 26 シートを再湿潤し乾燥後のカール特性

注 A: 可変変圧器 B: 位相指示計
C: ボルトメーター D: 湿度計
E: 湿度調節計 F: 空気調節用バルブ
G: 蒸気発生器 H: ファン

図 27

この場合、シート“X”が湿潤されるので伸び、これにつれラミネート状シートも一体となって伸びを示すので、まずこの“伸び”を測定した。続いてこの“X”サイドのみが湿潤しているラミネート状シートを乾燥させ、今度は乾燥後の“収縮”の大きさを測定した。

次にラミネート状シートを元のシート、すなわち、シート“X”、“Y”に分離し、それぞれもとの寸法に対する“伸び”、“収縮”の大きさを図 27 のような特別な装置を作成し測定した。この際、ラミネート状シートより、もとのシート“X”、“Y”に分離させるのに便利のように、ラミネート状シートを作成する際、直径0.1 mm のワイヤーを試験片幅方向に埋め込むような特別な配慮を行っている。

表 5、図 28 が本実験の結果で、図 28 の縦軸はもとの長さに対する伸びの割合で%で示されている。

表 5 湿潤及び乾燥が紙の寸法に及ぼす影響 (荷重 20 g)

シリーズ	試料数	叩解時間	乾 燥 法	元の寸法に対する長さの変化 (平均の%)				
				湿潤伸び	乾燥縮み	ぬらさなかつたプライ (Yシート)	ぬらしたプライ (Xシート)	プライの長さの差
A	4	末叩解	吸取紙	+ 0.135	- 0.008	+ 0.031	- 0.008	0.039
B	4	末叩解	リング	+ 0.075	- 0.024	+ 0.018	- 0.003	0.021
C	4	16 分	吸取紙	+ 0.093	- 0.093	+ 0.002	- 0.044	0.046
D	22	16 分	リング	+ 0.071	- 0.111	- 0.036	- 0.111	0.075

本実験結果を要約すると次の通りである。

- 1) ラミネート状シートは“X”, “Y” 2枚のシートをはりあわせたものであり, ひとつのユニットとして作動するので, 伸び, 収縮に対し両者とも同じ挙動を示す。
- 2) 図 28 A~D はそれぞれの条件で行った際のラミネート状シートの伸び, 収縮, 及びラミネート状シートを, もとのシート“X”, “Y” に剥離した際の寸法変化を示したものである。
- 3) すなわち, ラミネートを構成している“X”, “Y” シートのうち, 前記のごとく“X”シート側のみをぬらすと, ラミネート状シートはひとつのユニットとして働くので, A~Dいずれのテストでも“伸び”を示す。この場合“X”シートは“Y”シートに対し張力を与える。
- 4) 上記の状態より引き続きラミネートを乾燥させると, ラミネート状シートはもとの寸法より収縮する。この際, “X”シートは“Y”シートに対し今度は圧縮力を与える。
- 5) その後, ラミネート状シートを“X”, “Y” 各シートに剥離し長さを測定すると, あらかじめぬらされた“X”シートの方は A~D いずれの場合でも, もとの寸法より収縮している。
- 6) ドライでぬらさなかった方の“Y”シートは, 実験 A, B の条件 (シート末叩解) では, もとの寸法より伸びを示し, C, D の条件 (シート叩解) では寸法変化なし, もしくは収縮を示す。そして, その値は“X”シートの収縮率より小さい。
- 7) 図 28 A~D のテストにおけるラミネート状シートのカール曲率は, シート表裏寸法差から計算したものに一致する。
- 8) 図 28 A~D テスト後 (“X”シート側のみを湿潤, 再乾燥後) の“X”, “Y” 両シートの弾性率を測

図 28 湿潤及び再乾燥時におけるラミネート及び個々のプライの寸法変化 (荷重 20 g)

定したところ, 次のような結果を得た。

- (1) 一度湿潤させ, 再乾燥させた“X”シートの破断時の弾性率 1.98
 - (2) 全くぬらさないで再乾燥させた“Y”シートの破断時の弾性率 2.74
- で, ぬらさないで乾燥させた“Y”シートの弾性率の方が大である。
- 9) 以上の結果を実際操業に当てはめると次のようになる。
 - (1) 最終ドライヤー出口でシートのトップ, 及びワイヤーサイドに乾燥条件により水分差があり, 仮にトップサイドがウェット状 (図 28 の実験で“X”シートに相当) だとする。
 - (2) ウェット状のトップサイド (“X”側) が最終的に大気中で水分を放湿し, 乾燥される面となるので

収縮しようとするが、この場合の収縮率はワイヤーサイド(図28の実験で“Y”シートに相当)よりトップサイドの方が大となり、両サイドの収縮率の差がカールの原因となる。

(3) トップサイド(“X”シート側)が最終的に乾燥される面となり収縮しようとするが、ワイヤーサイド(“Y”シート)の方の弾性率が大なので、これを抑制しようとする。

この収縮しようとする力とこれを抑制しようとする力はどこかで均衡し、トップ、ワイヤー両サイドの潜在的な寸法差となる。

(4) 巻取から断截され1枚のシートとなると、上記(2)(3)項が顕在化しカールを起す。

(5) シートは水分が最後に乾燥される面(“X”シート側)を内側にしてカールし、その曲率の大きさは表裏両サイドの寸法差(図28の実験でラミネート状シート剥離後の“X”、“Y”両シートの寸法差)に等しい。

以上が3.2.1項で示したシート繊維配向性の差異に起因するカールとは別に、W. Gallay らが実験を通して行ったシート表裏両サイドの乾燥条件(水分差)の相違により、カールが発生するメカニズムの解明の大略で、これより W. Gallay らはカールを是正するにはドライヤーアクションをとり、シート表裏両サイドの乾燥条件を調節する必要があるとしたのである。

3.3 カールに関する W. Gallay らの理論について

既述の通り W. Gallay らは1950、60年代を通じて膨大な実験と研究を重ね、カール理論を確立し、現在でもこれが一種の教典となっているのであるが、その主体をなしているものは3.2.1、3.2.2項で記述した「繊維配向性」と「乾燥条件」であり、特に図21の極線図を有力な根拠としている。

当時の抄紙技術と現在の抄紙技術では格段に差があり、抄速も遅くツインワイヤーマシンはもちろんのこと、フォイル、ウエットサクションボックス等の新しい脱水エレメントもあまり普及していなかった時代であり、また、当時は走査電子顕微鏡も充分に発達しておらず、現在改めて走査電子顕微鏡を駆使して紙表面の繊維配向性を調べた場合、抄紙技術進歩による紙層形成の格差等も考えあわせると、果して図21のような極線図を画くのか、念のため検討を試みる必要があるように思われる。

また、W. Gallay らの理論では、紙のトップ、ワイヤー両サイドにおける繊維配向性の差がカール曲率に比例するとしているが、われわれの経験ではカールは種々雑多な、複雑な要因が絡み発生するもので、前

記の通り抄紙技術が当時と著しく進歩している昨今では、図23のようなきれいな直線が画けるのか、この点についても念のため、確認を行う必要があるように思われる。

W. Gallay らは紙の物性のなかでもっとも解明の困難な“カール”に対し、科学的な手法を用いメスを入れた最初の研究者達で、大変な業績と功績を残したのだが、繰返しになるが抄紙技術が当時とは比較にならないほど向上している今の時点で、“カール”に対し W. Gallay らの理論、特に3.2.1、3.2.2項のみに捉われ、次号で説明のごとく幅広く検討を行わないと、ややもすると焦点が外れ、実際操業における“カール”問題の解決を遅らせる感がしないでもない。

4. 紙の寸法安定性に関する A. Tydeman らの理論

A. Tydeman ら²⁷⁾は W. Gallay らとは別に、紙の寸法安定性に対し研究を行い、大略次のような結論を導いている。

- 1) ウエットシートを乾燥させた場合、シートの平均収縮率は縦方向全繊維の平均収縮率に等しい。
- 2) 単繊維の乾燥による収縮率は縦方向1~2%、幅方向20~30%だが、シートの場合の縦方向の繊維の収縮率は、上記と全く異なり12%にも及ぶときがあり、この場合のシート全体の収縮率も12%である。
- 3) これは繊維幅方向の収縮が交差する繊維の縦方向に対し、圧縮力を与え変型することに起因する。
- 4) 図29(a)(b)がこの辺を説明した模式図で、交差する繊維の接合領域を顕微鏡観察すると、この領域では繊維内収縮が発生する水分(図11参照…繊維飽和点で約30%)より、ずっと前の時点、すなわち45~50

注：乾燥により単繊維の収縮がシート全体の収縮に及ぼす影響を説明した模式図、及び断面図で、交差する繊維の幅方向の収縮により、縦方向の繊維内に圧縮力が働いている。

図 29

図 30 乾燥時のネッキング現象の模式図

で繊維間接合, もしくは結合 (contact or bonding) が既に行われている (著者注: この発見までは繊維間結合は繊維飽和点より開始すると考えられていた)。

5) この結合 (抵抗) 効果により, 繊維内収縮が始まっても, 結合領域より結合領域外の繊維が幅方向に對し大きく収縮する。

6) すなわち, 図 30 の実線は膨潤状態の繊維を示し, 乾燥が進むと繊維は幅方向に収縮し破線のような状態となり, 図 30(b) のように結合領域も変化する。また, 同時に図 30(a) のように結合領域の変化がほとんど認められず, 接合面以外に繊維の幅方向のみが収縮する場合も認められる。

7) 図 30(b) のような状態をネッキング (necking) と呼ぶ。この現象は結合領域以外の繊維は幅方向に収縮するが, 結合領域では収縮発生前に接着, もしくは結合 (contact or bonding) が行われるので, 上例の繊維の幅方向の収縮は下側の繊維により抵抗を受け, 繊維単独で幅方向に収縮する場合より小となるが, 反面, 下側の繊維を長さ方向に収縮させようとする力が働く。

8) 結合領域における繊維の幅方向の収縮力と, 縦方向の収縮 (圧縮) に対する抵抗力のバランスで縦方向の収縮が決り, 最終的なシート全体の収縮量が決定する。

9) 図 29 に示すような繊維幅方向の収縮により, 繊維縦方向の収縮を “マイクロ・コンプレッション (micro-compression)” という。

10) 交差する繊維間のスパーン (図 29(a) AB 間) が長ければ, スパーンに “よじれ (kinks)” が生じ易く, 短かければマイクロ・コンプレッションにより “しわ (wrinkles)” が発生し易い。

すなわち, A. Tydeman らの理論は, 紙の平均収縮量は木材全繊維の縦方向平均収縮量と同じで, これは結合領域における繊維の収縮量に等しいとしたのである。

A. Tydeman らが行った実験で使用したシートは,

坪量 15 g/m^2 の手抄きシートであり, 坪量大となった場合, A. Tydeman らの理論が, 立体的に, 3 次的にどのように影響を受けるようになるかは明確にされていない。

ただ, カールを含めて紙の寸法安定性の問題に関しては, ややもすると W. Gallay らの理論がクローズ・アップされがちだが, 一方に A. Tydeman らの貴重な知見もあることも十分に留意する必要があると思われる。

(以下次号)

文 献

- 1), 3) G. Collins : J. Textile Inst. 21, T 311 (1930)
- 2) A. Urguhart & A. Williams : J. Textile Inst. 21, T 499 (1930)
- 4) 5) 6) W. Brecht : Fundamentals of Paper Making Fibers, Ed. F. Bolam, 1958.
- 7) A. Urguhart & A. Williams : J. Textile Inst. 15, T 559 (1924)
- 8) H. Rance : Tappi 37 (12), 640 (1954)
- 9) H. Rance : Some Recent Developments in Reology, 90, 1950, United Trade Press, London.
- 10) D. Page & P. Tydeman : Nature 199 : 471 (1963)
- 11) 木島常明ほか : 紙パ技協誌 32, (11), 654 (1978)
- 12) B. Steenberg : Behaviour of Paper Stress and Strain (1949)
- 13) 14) G. Nuttall : P. T. J. Apr. 13, 1970
- 15) 木島常明ほか : 紙パ技協誌 33 (10), 60 (1979)
- 16) 木島常明ほか : 紙パ技協誌 32 (10), 37 (1978) より 33 (12), 46 (1979) まで 8 回にわたり記載
- 17) 石黒久三郎 : 紙層形成の科学, 紙パ技協誌 33 (4), 227 (1979)
- 18) 石黒久三郎 : 最近の抄紙技術について (1), 紙パ技協誌 37 (3), 221 (1983)
- 19) 21) W. Gallay, P. Glynn, H. Jones : PPMC, Oct. 1959.
- 20) 門屋 卓, 白田誠人, 大江礼三郎, 木島常明ほか : 製紙科学 p. 374 (中外産業, 1982)
- 22) W. Gallay, P. Glynn, H. Jones : PPMC Oct. 1959.
- 23) W. Gallay, P. Glynn, H. Jones : PPMC Jan. 1961.
- 24) W. Gallay, P. Glynn, H. Jones, PPMC Aug. 1962.
- 25) W. Gallay : Tappi, Nov. 1973.
- 26) W. Gallay : Tappi, Dec. 1973.
- 27) D. Page & P. Tydeman : Formation and Structure of Paper, Ed. F. Bolam, 1962 & Consolidation of Paper Web, Ed. F. Bolam, 1966.