紙の表面ラフニング機構に関する研究(第2報)*

面外(厚さ)方向に生成する内部応力の影響とその評価

東京大学大学院農学生命科学研究科 佐々木潔、江前敏晴、尾鍋史彦 韓国慶北大学校農科大学 金鳳庸

Mechanism of Paper Surface Roughening (Part)

Influence of out-of-plane internal stress on roughening and its evaluation

Kiyoshi Sasaki, Toshiharu Enomae and Fumihiko Onabe Graduate School of Agricultural and Life Science, The University of Tokyo

Bong-Yong Kim College of Agriculture, Kyungpook National University, Korea

Abstract =

Release of internal stress has been referred to as one of the causes for surface roughening of paper. However, occasionally drying-induced stress is not corresponding to the roughening. The authors assumed that roughening is not caused by release of in-plane internal stress built in drying, but of transverse internal stress built in transverse processes such as calendering and wet-pressing. The analytical procedure of Kubát for determining in-plane internal stress was attempted to apply to the transverse compressive mode to determine the transverse internal stress. A straight-line portion was found at higher initial stresses in the plots of relaxation speed per unit logarithmic time versus initial stress (Kubát's plot). The slope and the offset of this straight-line portion were varied with the forming process. The initial stress at a relaxation speed of 25 N/log(s) was defined as an index of transverse internal stress. Consequently, the greater the calendering, wet-pressing and beating, the higher the transverse internal stress (the slower the relaxation). But, the amount of loaded calcium carbonate did not affect it. The transverse internal stress had influence on surface roughening of paper, but the relationship was observed to be different between the papermaking processes. Besides,

^{*}佐々木潔, 江前敏晴, 尾鍋史彦, "紙の表面ラフニング機構に関する研究(第1報) ラフニングに 及ぼす面内内部応力の影響",紙パ技協誌 53(12), 1639-1645(1999)を第1報とする。

the transverse internal stress was likely to be associated with apparent sheet density depending on the fiber source and the way of sheet making. The authors considered that the degree of fiber collapse and viscoelasticity are closely related to the transverse internal stress.

Keywords: Beating, Calendering, Filler loading, Out-of-plane internal stress, Surface roughening, Wet-pressing

1. 緒言

水を分散媒とする顔料塗工や湿し水を使うオフセット印刷の際に紙が粗面化する現象 (表面ラフニング)は、繊維の毛羽立ち¹⁾、繊維の断面形態が扁平状から管状に回復する現 象、繊維間結合の切断、繊維の膨潤及び内部応力の解放²⁾が原因であると考えられてきた。 内部応力は一般的には緊張乾燥中に繊維や繊維のネットワーク構造の中に蓄えられ、乾燥 張力を取り除いても残留する応力であると定義される。また残留応力という意味では通常 弾性変形として蓄えられるものと解釈される。佐々木ら^{3,4)}が弾性限界内の範囲で曲げ応力 を与えることにより湾曲した集成材のはりを調製しその残留応力分布を理論的に計算し、 また測定した。実測値が理論値からはずれる理由として応力の緩和を指摘している。 Johanson と Kubát ら^{5,6)}は引張応力緩和の測定により紙の内部応力を測定する方法を提案 した。そして内部応力値は乾燥張力により変化し、水に浸漬したり高湿度下に曝すことに より緩和することを示した。張力をかけなければ紙は乾燥時に収縮する。乾燥収縮量は内 部応力とは反対の概念となるが、木村⁷⁾が指摘したように紙の物性に大きく影響する。その 報告では引張試験においてまったく収縮せずに乾燥した紙の伸びに加えてその紙が乾燥中 に収縮した長さに相当する分だけ伸びて破壊することを見出している。

実際問題として内部応力はどこにどのように蓄えられているのであろうか。繊維が交差 する点に見られるマイクロコンプレッション⁸⁾がおそらくその役割を担っていると考えら れる。また乾燥時に繊維内の水素結合が生成する際、フィブリル傾角のために繊維がねじ れることも関係していると考えられる⁹。

しかし、乾燥張力に由来するこのような内部応力が表面ラフニングに直接関与している とするのは疑問の余地がある。Additon¹⁰は相対湿度 97 %下に広葉樹クラフトパルプから 調製した手抄き紙を 1 週間曝したにもかかわらず表面特性にほとんど変化がないという結 果を得た。つまり、光沢にわずかな低下が見られたが、その低下は有意ではなく、パーカ ープリントサーフ(PPS)粗さは変化がなかった(厚さは2%増加)。一方Kubát法による 内部応力は叩解の程度にもよるが 24~38 %低下した。同様に市販ボンド紙は光沢と PPS 粗さに有意な変化はなかったが内部応力は 33 %低下したという結果を得ている。これらは 表面ラフニングを起こさず内部応力が低下した例である。著者らは前報¹¹)で述べたとおり次 のような知見を得た。市販上質紙を水に浸漬して乾燥すると内部応力の低下とともに平滑 度が低下したが、この試料をカレンダーがけし元の紙と同程度の平滑度にした場合は再浸

漬-再乾燥処理によって平滑性は元の紙と同様に低下したものの内部応力には変化がなかった。これは内部応力が変化せずに表面ラフニングが発生した例にあたる。

これまで述べてきた内部応力とは全て乾燥中の面方向の張力に由来するものであった。 だが、その材料に加えられた応力に異方性がある以上、内部応力にも異方性があるはずで ある。したがってカレンダリングのような面外(厚さ)方向に作用する圧縮応力は紙の厚 さ方向に内部応力を生成すると考えるのが自然である。面外方向の内部応力を測定するた めに Kubát の方法を圧縮モードに応用したところ、圧縮モードの応力緩和曲線はシートの 製造履歴によって異なった挙動を示した。そこで、その挙動を表面ラフニングの観点から 考察した。

2. 理論

2-1 面内内部応力(Kubát法)

Kubát^{5,12)}が提唱した測定方法である。引張モードにおいて、設定(初期)荷重に達した あとの経過時間の対数に対する荷重の緩和速度を記録する。この速度をいくつかの初期荷 重に対してプロットして得られる直線関係を初期荷重軸に外挿した点から内部応力を求め る。詳しくは前報で述べた。

2-2 面外内部応力

Kubát 法を圧縮モードに適用した。面外内部応力は一般的に繊維の潰れに関係すると考 えられる。Robertson¹³は、ウェットプレス工程で化学パルプ繊維が潰れ、その潰れを維持 する内部応力は乾燥時に生成すると述べている。乾燥した繊維の再膨潤は内部応力の解放 によって生じ、繊維壁内の結合が切断すると元の繊維の形態を回復しようとする力が作用 する。しかし、内部応力の解放が時間、温度及び可塑化に影響されて進行するとしたらそ の繊維形態の回復は不完全なものになると考えた。Robertson が述べている内部応力の解放 は水で再膨潤する際の繊維レベルでの形態の回復に限定されているが、ここではそれに加 えてさらに再乾燥する前後で内部応力がどの程度解放されたか、繊維間結合の切断と個々 の繊維の形態回復によってどの程度繊維間隙が増加したか(ネットワーク構造の変化)と いうことも含めた意味での面外内部応力の変化を考えようとするものである。

Forseth¹⁴はカレンダリング工程で潰された機械パルプ繊維に蓄えられた応力が水分に よって解放されるときに円管状の形態が回復することを示した。この繊維形態の回復は表 面ラフニングに影響し、繊維壁が厚いほどその影響は大きくなると述べた。

江前ら^{15,16}は手抄き紙を水に浸漬、離解又は叩解して凍結乾燥した後に得られたクラフト パルプ繊維を乾燥ラップパルプから離解したパルプ、又は乾燥履歴の全くないパルプの繊 維と比較した。どのような機械的処理も乾燥履歴のないパルプ繊維のような円管状構造を 回復させることはなかったがラップパルプを叩解したときにはごく一部の繊維でそのよう な回復が見られた。クラフト繊維の場合、形態回復は表面ラフニングの主要因にはなって

いないことを明らかにした。

3. 実験

3-1 試料

表1及び2にカレンダリング、ウェットプレス、叩解及び填料の配合の効果を調べるた めに調製した試料をまとめた。カレンダリング系列試料ではNBKP/GP/TMP=15/40/45 を 原料とする機械抄き中質紙を用いた。ラボ用スーパーカレンダを使用し、約8%の含水率の 試料に対し29及び49N/mの線圧で処理した。ウェットプレス、叩解及び填料(炭酸カル シウム)配合の各系列試料ではLBKPから手抄き紙を調製した。叩解系列の試料では未叩 解、PFI ミルで5000回及び20000回叩解した3種類のパルプから調製した。ろ水度はそ れぞれ639、460及び260ml CSFであった。ウェットプレス及び叩解系列の紙料には填料 やその他の薬品は添加しなかった。叩解系列以外の手抄き紙試料ではPFI ミルで5000回叩 解した。填料の炭酸カルシウムには白石工業㈱製PCを用いた。手抄き紙は全てJIS 規格に 基づいて調製した。

3-2 平滑度

平滑度は王研式平滑度計(旭精工製)で測定した。結果の図ではベック平滑度(王研式 平滑度)の3 乗根を目盛ってあるが、これはこのディメンションがパーカープリントサー フ粗さの逆数に相当するからである¹⁷。

3-3 圧縮モードの応力緩和

圧縮試験ではそれぞれ7~9枚の試料を積み重ね、合計坪量が約480g/m²(実際には444~590g/m²)となるようにした。積み重ねた試料はロードセルとクロスバーの間に挟み、なるべく均一に圧縮されるようにコイン状の金属片を試料の上に置いた。圧縮される面積は707mm²であった。図1に試料の置き方を示した。圧縮速度は4mm/minとした。圧縮 試験機はオリエンテック製UTM--100を用いた。

4. 結果と考察

4-1 紙の圧縮 - 荷重曲線

図 2 に圧縮 - 荷重曲線を示す。圧縮荷重が急激に上昇したあとに圧縮動作を止め、その 荷重を 120 秒間記録した。荷重の減少を時間の対数に対してプロットすると 0.5 秒経過後 以降は直線関係を示した。引張モードで認められた対数時間則 ⁴⁾は圧縮モードにも適用でき ることがわかった。荷重減少を示す直線の傾き、すなわち緩和速度を何段階かに設定した 初期荷重について求めた結果、両者の関係(Kubát プロット)は引張モードと同様に 2 つの 直線部分から成り立つことがわかった。

4-2 面外内部応力に及ぼすカレンダリングの影響

図 3 はカレンダリング系列試料の初期荷重に対する緩和速度の関係(圧縮モードでの Kubát プロット)を示す。どの試料での関係も低初期荷重側でやや急な直線部分を経て、高 荷重側で緩やかな直線部分をたどる。急な方の直線部分は必ずしも原点を通るわけではな く、この直線を外挿すると、初期荷重軸上の切片は負の値を取る。これらの特徴は一部引 張モードでの Kubát プロットに似ているが、大小(正負)関係が全く逆になっている。カレ ンダーがけを行った試料では未カレンダー試料に比べて緩和速度は小さかったが、線圧 29 及び 49 N/mの試料間では違いが見られなかった。浸漬処理、すなわち水に 24 時間浸漬し たあと自由乾燥させると、いずれの関係も緩和速度が大きくなる上方向に移動し、ほぼ同 一の位置に並んだ。Kubátの引張モードに対する理論によれば後半直線部分を外挿した初期 荷重軸での切片が内部応力を示すと解釈される。内部応力の大小に関係なくどの試料に対 する傾きも一定値 0.1 を取るからである。しかし圧縮モードでは、これに相当する直線部分 は浸漬処理の有無によりかなり傾きが異なった。そこで、ここでは初期荷重 294~687 Nの 範囲の後半直線部分を外挿し、緩和速度が 25 N/log(s)に相当する初期荷重を面外内部応力 指数と定義した。表 2 にこの定義にしたがって計算した各試料の内部応力を示した。25 N/log(s)という値は特に意味を持たないが、測定範囲の平均値に近い値を設定した。引張モ ードの場合も内部応力の値を決定するとき、各試料の直線は実験的には必ずしも完全に平 行になるわけではなく、ある緩和速度でどの程度直線にずれがあるかを調べた方が内部応 力の評価として適切な場合もある。また、試料をまったくおかない場合でも圧縮試験機の 各部のわずかなねじれなどにより応力緩和が多少見られるので、上記のようにして求めた 内部応力の差は意味を持つが、値そのものはその試料固有のものではない。直線の傾きも 内部応力の指標になりうるかについて検討したが、秩序だった結果は得られなかった。

4-3 面外内部応力に及ぼすウェットプレスの影響

図4はウェットプレス系列試料のKubátプロットを示す。ウェットプレスを強くすると 緩和速度は小さくなることは明らかである。上記で定義した内部応力の計算に基づくとウ ェットプレスは面外内部応力を生成すると考えられる。浸漬処理は49kPa-1分の条件の 試料を除いて内部応力を低下させた。この結果は、低レベルのウェットプレス条件では繊 維及びそのネットワーク構造が浸漬処理では変化しないことを示唆する。その他の2つの 高強度ウェットプレス条件でも面外内部応力の減少はカレンダーがけした中質紙に比べる とはるかに小さいことがわかった。

4-4 面外内部応力に及ぼす叩解の影響

図 5 に叩解系列試料の Kubát プロットを示す。叩解の程度を強くすると面外内部応力は 大きくなった。未叩解試料では全初期荷重範囲にわたって 1 本の直線で表現された。十分 には扁平に潰れていない未叩解繊維からなる紙は全範囲にわたって同じメカニズムで緩和

が起きることを意味するものと考えられる。浸漬処理はどの条件でも面外内部応力を減少 させたが、未叩解試料での減少が意外にもかなり大きかった。この点で最も弱い条件でウ ェットプレスした試料と異なっていた。一般的に叩解は繊維に柔軟性(湿潤時)を与える ことにより、繊維内及び繊維間結合を促進する。ウェットプレスは特に繊維同士の接触を 高めることにより繊維間結合を促進する。未叩解で中庸の条件でウェットプレスした試料 は浸漬処理によりわずかに円管状形態を回復し、それが緩和速度を大きくしたと考えられ る。対照的に、中庸に叩解し弱い条件でウェットプレスした試料は浸漬処理による繊維の 形態変化はほとんどなく¹⁵、緩和速度に変化が見られなかったと考えられる。しかし繊維 形態の変化について検証が必要である。

4-5 面外内部応力に及ぼす填料配合の影響

図 6 に填料配合系列試料の Kubát プロットを示す。炭酸カルシウム添加量の異なる 3 種 類の試料についての関係はまったく同じで、わずかに見られる差も実験誤差の範囲である と考えられる。填料の配合は面外内部応力に影響しないと言える。多量の填料配合により 繊維間結合結合が少なくなっても内部応力には関係しないことになる。むしろ、繊維の潰 れやそれによる繊維の堅さ及びネットワーク構造としての空隙率が面外内部応力を決定す る要因であることがわかる。

4-6 面外内部応力と平滑度の関係

坪量による補正は行ってないので完全には正確ではないが、全ての試料の面外内部応力 (表2)を比較すると、叩解が面外内部応力を増加させるのに最も効果があることがわかる。 次にカレンダリング、その後がウェットプレスであった。図 7 は面外内部応力とプレート 面とろ紙面の両面で平均した王研式平滑度の3乗根の関係を示す。それぞれ2点を結ぶ直 線は浸漬処理による変化を示す。左下に来る点が浸漬処理後の値を示している。填料配合 紙料を除く(プロットから除外してある)全てのクラフトパルプから調製した手抄き紙に ついて面外内部応力が大きいほど平滑度も高くなることがわかる。カレンダーがけした中 質紙のグループも同様の傾向を示したが同じ面外内部応力でクラフト手抄き紙と比較する と平滑度は低かった。さらに浸漬処理による面外内部応力の減少はクラフト手抄き紙より 大きかった。機械パルプの場合、扁平状から円管状への繊維形態の回復が表面ラフニング の主要因であるとみなされている 14が、この点からすれば浸漬処理による繊維形態の回復 は面外内部応力の減少に大きな影響を与えることになるであろう。すわなち面外内部応力 の生成・解放は繊維形態の回復挙動を、さらには繊維間結合の切断によるネットワーク構 造の弛緩を含めた概念であると考えられる。なお、浸漬処理では面内内部応力も必然的に 同時に減少し、両内部応力の解放がラフニングに与える影響を区別できない。しかし、面 内内部応力によるラフニングは表面粗さより大きなレベルの変形(コックリングなど)を 引き起こし、王研式平滑度にはそれほど反映されないと考えている。

図 8 はシートの見かけ密度に対する面外内部応力を示す。過去の文献¹⁸⁾では繊維ネット

 $\rho^3 - \rho_0^3 = MP^N$

ワーク構造の圧縮過程は密度に関して次の式で表現できるとしている。

ここで ρ及びρ₀は加圧下及び非加圧下での密度、Pは圧力、M及びNは定数である。歴 史的には水中にある繊維マット¹⁹)や羊毛繊維塊²⁰についても同様の式が適用されてきた。こ の式を改良した式も提案され板紙に適用された²¹。浸漬処理前後のクラフト手抄き紙及び浸 漬処理後のカレンダーがけした中質紙試料に対するデータ点を見ると全ての点が1つの曲 線上に乗っており、見かけ密度と密接な関係にあることがわかる。処理前のカレンダーが けした中質紙試料だけはこの曲線からはずれている。圧縮時には何か異なったメカニズム がこの試料に作用していると考えられる。

4-7 圧縮過程での紙の挙動

圧縮過程あるいは応力緩和過程で紙に何が起こっているのであろうか。おそらくは初期 の段階では、ウェットプレスやカレンダリング直後の応力緩和により生じた繊維間の小さ な空隙が隣接する繊維が接近することにより埋められていくだろう²²)。それと同時に繊維は 屈曲し、不完全に潰れていた繊維はさらに潰れるであろう。高荷重になるとラメラ間ある いはフィブリル間の間隙も潰されて行くであろう。緩和過程では、繊維の充填、屈曲、繊 維の潰れ及び繊維壁の潰れが引き続き起こるのに加えて流動的な変形 - 繊維あるいはその 一部が応力の疎となった部分へと向かう流動 - がおそらく進行するのではないかと考えら れる。

柳田ら²³はパーティクルボートを製造する際のホットプレス工程をいくつかの段階に分類した。個々のチップ要素が互いに衝突と摩擦を起こしながら充填していく過程、充填に抵抗を示す過程、個々のチップ要素が曲げ及び圧縮変形する過程、ボードが面方向に伸張する過程の4段階である。各段階はチップ要素を規則的に配列した構造では明確に区別されるが、ランダムな配列では不明確であった。最後の段階は9.8 MPa以上の圧力で見出されるということだが、本実験での最大圧力は0.97 MPaであった。このことから充填段階及び要素レベルの変形だけが本実験での圧縮応力緩和メカニズムとして作用していると考えられる。

Jacksonらは種々の紙について相対圧縮(初期厚さに対する最大圧力での圧縮量の比率) と相対拡張(最大圧縮量に対する圧力除去後の弾性回復量の比率)を測定した。その結果、 叩解は相対圧縮を減少させ、クレーの内添は相対圧縮に無関係であり、塗工は相対圧縮を 大きく減少させ、100 で乾燥すると相対圧縮は減少した。彼らは繊維壁が堅くなると相対 圧縮が減少するが弾性回復は増加すると考えた。本研究での応力緩和も彼らの結果と非常 によく一致している。例えば叩解は緩和速度を低下させたがそれは弾性回復を増加させた 結果と考えることができる。彼らはまた平滑度と相対圧縮の間にある種の関係が存在し、 それはパルプ化法にも依存すると述べており、ここにも共通点が見られる。高い面外内部 応力を蓄えている紙は通常叩解、ウェットプレス及びカレンダリングによって繊維が極度 に潰されている。このような紙は繊維内の空隙(ルーメン)がほとんどなく応力が緩和す るための流動変形が起こりにくい。特に叩解は繊維を堅くし、流動性を低下させる。した

がってこのような面外方向に作用する工程は面外内部応力を増加させることになる。原料 が機械パルプと化学パルプのような原料の違いがどう平滑度に影響するかを考えるには他 にも考慮すべき要因がある。機械抄きか手すきかの違いなどである。これらを考慮してさ らに正確な解釈を与えることが今後の課題となる。

5. 結論

紙の表面ラフニングを引き起こす主要因は乾燥時に蓄えられる面内の内部応力ではなく、 カレンダリングやウェットプレス工程で蓄えられる面外の内部応力である、という新しい 概念を提唱した。Kubát が提案した面内の内部応力を求める手法を圧縮モードに適用し面外 の内部応力を求めた。時間の対数に対する応力緩和速度を初期荷重に対してプロット(Kubát プロット)すると高荷重側に直線関係を示す部分が見出された。この直線部分の傾きと位 置はその紙の持つ製造履歴と密接な関係があった。理論的な議論をさらに要するものの、 緩和速度が 25 N/log(s)となる初期応力を面外内部応力指数と便宜上定義した。結果として カレンダリング、ウェットプレス及び叩解を強くすると、圧縮応力緩和速度が小さくなり、 面外内部応力は増加した。しかし、炭酸カルシウムの内添配合量は影響しなかった。面外 内部応力の解放量は紙の表面ラフニングと関係があったが、その関係は抄紙工程にも依存 するものであった。さらに面外内部応力は、繊維の種類や抄紙法にもよるが紙の見かけ密 度と関係があった。繊維の潰れの度合いや粘弾性が面外内部応力に密接に関係すると考え られた。

謝辞

カレンダーがけ機械抄き紙を御提供頂いた北越製紙㈱の金子正一郎氏及び佐藤勤氏に感謝 いたします。この研究の一部は平成8年度文部省科学研究費(奨励A)No.08760158によ って行われました。記して謝意を表します。

本研究の一部を 1999 Tappi Advanced Coating Fundamentals Symposium, Toronto, Canada (1999 年 5 月)で発表した。

文献

- 1. Leslie, F.: Paper Technology, 33(10), 11-13(1992)
- 2. Skowronski, J., : J. Pulp Paper Sci., 16(3), J102-110(1992)
- 3. Sasaki, Y., Okuyama, T. and Kikata, Y.: Mokuzai Gakkaishi, 27(4), 270-276, 277-282(1981)
- 4. 佐々木康寿,都築一雄,足立清和:木材学会誌,37(7),661-667(1991),37(8),694-701(1991)
- 5. Johanson, F and Kubát, J.: Svensk Papperstidn., 67(20), 822-832(1964)
- 6. Johanson, F., Kubát, J. and Pattyranie, C.: Svensk Papperstidn., 70(10), 333-338(1967)
- 7. 木村実,学位論文,東京工業大学,67-75(1996)

- 8. Page, D. H. and Tydeman, P. A.: Formation and structure of paper, ed. by Bolam, F., Tech. Sect. BPBMA, London, p397-413(1962)
- 9. Higgins, H. G. and McKenzie, A. W.: Appita, 16, 145(1963)
- 10. Additon, D. L.: Ms. thesis, University of Maine, USA, 54-56 (1996)
- 11. 佐々木潔, 江前敏晴, 尾鍋史彦: 紙パ技協誌, 53(12), 1639-1645(1999), 繊維学会予稿集, G-87 (1996)
- 12. Kubát, J. and Rigdahl, M.: Materials Sci. and Eng., 24, 223-232(1976)
- 13. Robertson, A. A.: Pulp Paper Mag. Can., 65(3), T162-168(1964)
- 14. Forseth, T. and Helle, T.: J. Pulp Paper Sci., 23(3), J95-100 (1997)
- 15. Enomae, T. and LePoutre, P.: Nordic Pulp and Paper Research Journal, 13 no.4:14-18(1998).
- 16. Enomae, T. and Lepoutre, P.: Proceedings of PTS Symposium, Munich, Germany, 10E(1998)
- 17. Enomae, T. and Onabe, F.: Sen'i Gakkaishi, 53(3), 86-95 (1997).
- 18. Han, S. T.: Pulp Paper Mag. Can., 70(9), 65-77(1969)
- 19. Wilder, H. D.: Tappi, 43(8), 715-722(1960)
- 20. van Wyk, C. M.: J Textile Inst, 37, T285-T292(1946)
- 21. 大崎茂芳, 藤井良彦,徳司生一: 紙パ技協誌, 34(5), 367-374(1980)
- 22. 大崎茂芳, 藤井良彦: 紙パ技協誌, 32(8), 476-484(1978)
- Yanagida, M., Nishimura, T. and Ando, N.: "Behavior of wood chip elements in hot-pressing the wood chip matte", Abstracts of the 48th annual meeting, Japan Wood Res. Soc., Tokyo, 295(1998)

Process	Fiber source	Sheet-making	Composition	Condition	
Calendering	Wood-containi ng	Machine-made	Softwood kraft/ GWD/TMP =15/40/45	Uncalendered 29 kN/m supercalendered 49 kN/m supercalendered	
Wet-pressing	Wood-free	Handsheet	Hardwood kraft 100 %	49 kPa for 1 min 343 kPa for 5 min 686 kPa for 20 min	
Beating	Wood-free	Handsheet	Hardwood kraft 100 %	Unbeaten, 639 ml CSF 5000 rev. PFI,460 ml CSF 20000 rev. PFI, 260 ml CSF	
Filler loading	Wood-free	Handsheet	Hardwood kraft 100 %	Unloaded 10 % to dry pulp 30 % to dry pulp	

Table 1 Furnish and process of paper samples used

Process	Condition	Number of sheets	Total basis weight, g/m ²	Stack thickness, μm	Apparent density, g/cm ³	Transverse internal stress index, N
Calendering	Uncalendered (soaked & dried)	8 8	586 591	1087 1240	0.540 0.477	649 372
	29 kN/m (soaked & dried)	8 8	581 589	989 1184	0.588 0.497	766 364
	49 kN/m (soaked & dried)	8 8	588 597	941 1202	0.624 0.497	743 376
Wet-pressing	49 kPa, 1 min (soaked & dried)	8 8	493 487	946 970	0.521 0.502	401 397
	343 kPa, 5 min (soaked & dried)	8 8	447 444	752 808	0.595 0.550	555 505
	686 kPa, 20 min (soaked & dried)	8 8	445 448	689 749	0.647 0.598	698 623
Beating	Unbeaten (soaked & dried)	7 9	491 465	1059 1045	0.463 0.446	345 288
	5000 rev. PFI (soaked & dried)	7 8	453 444	765 808	0.592 0.550	521 505
	20000 rev. PFI (soaked & dried)	7 7	448 444	620 645	0.722 0.689	867 722
Filler loading	Unloaded	8	522	849	0.615	407
	10 % to dry pulp 30 % to dry pulp	8 8	549 545	894 899	0.614 0.606	399 441

Table 2	Physical properties of samples used and transverse internal stress defined as an initial load at 25
	(N/log(s)) of relaxation speed



Fig. 1 Schematic diagram of sheet stacking in the compressive tester.



Fig. 2 Load-compression curve and procedure to determine relaxation speed of compressive stress.



Fig. 3 Relaxation speed of compressive stress vs. initial load (Kubát's plot) for wood-containing sheets variously supercalendered.



Fig 4. Relaxation speed of compressive stress vs. initial load (Kubát's plot) for handsheets variously wet-pressed.



Fig. 5 Relaxation speed of compressive stress vs. initial load (Kubát's plot) for handsheets of different revolutions in beating.



Fig. 6 Relaxation speed of compressive stress vs. initial load (Kubát's plot) for handsheets loaded with calcium carbonate.



Fig.7 Relationship between transverse internal stress determined by Kubát's method and Bekk smoothness.



Fig.8 Relationship between transverse internal stress determined by Kubát's method and Apparent sheet density.