

紙のトライボロジー概説

江前敏晴

東京大学 大学院農学生命科学研究科

1. はじめに

紙は、その製造工程や使用環境における様々な局面でトライボロジーが関与する。本稿では、紙のどのような工程でトライボロジーが関わっているかを概観し、次に最も端的な紙のトライボロジー要素と考えられる紙の摩擦係数について紙の性質とどのような関係にあるかを実験データ及び文献から考察することにする。

2. 紙の製造と使用におけるトライボロジー

紙の主原料は木材であり、その製造は木材の中から長さ 1~5 mm、幅 20~50 μm の 1 本 1 本の繊維を取り出すパルプ化工程から始まる。パルプ化では、木材チップの切削、機械パルプ製造工程における木材と砥石の摩擦などがある。抄紙工程では、パルプ繊維にスチール製の刃をぶつけて、毛羽立たせたり、細胞壁に層状の亀裂を入れたりすることによって繊維を柔軟化する工程である叩解処理（このような処理によって紙が形成されたときの繊維間結合が強くなる）、ブロンズ又は PET 製の抄紙ワイヤーが内添する炭酸カルシウムと接触することによる摩耗、あるいはサクシオンボックスと呼ばれる吸引口を持ったチャンバーの表面との摩擦による摩耗、プレス工程や乾燥工程で使用するフェルトやキャンバスの摩耗、すべてのパルプ化・抄紙装置でのパルプスラリーや薬液の輸送及び紙匹搬送用ロールとその軸受けの摩耗などが考えられる。さらに、抄紙工程の後半部に当たる加工工程では、スチール製又は樹脂製のロールによって紙を潰して平滑化するカレンダーリング処理での紙とロールの強い接触及びロールの摩耗、塗工工程では、顔料の水への分散処理、塗工液を転写させるロールやかきとるブレードの摩耗などが代表的である。抄紙工程の最後に紙を切り分ける工程ではカッターの摩耗がある。抄紙から加工に至る工程は紙の用途に応じて条件が大きく変わる。その結果表面にあるパルプ繊維の存在形態も大きく異なる。

図 1 にコピー用紙とティッシュペーパー表面の走査電子顕微鏡写真をしめす。また、古紙処理工程では、ニードル内で高濃度の古紙パルプを揉むことによってインキをパルプ表面から剥離させる処理などがある。その他、紙を倉庫で積み上げて保管する場合などでは紙の滑りによる積荷の崩れの問題がある。一方、紙を使用する環境においては、ニップ型の商業印刷（オフセット、グラビアなど）では、紙と版面又はインキとの接触が特に重要であり、コピー装置やパーソナルプリンタも含めて給紙部でのゴムロールや吸引パッドとの接触や摩擦も作業性という観点から重要な問題である。また印刷精度に重大な影響を及ぼす見当はずれ（多色印刷で印刷位置が合わないこと）や輪転印刷での紙流れ（紙が横方向

にずれること)も滑りが原因で起こることが多い。またティッシュペーパーなどの衛生用紙は、手や顔との摩擦や接触(肌触り)がその品質を左右する要素になる^{1, 2)}。

3. トライボロジーに関与する紙の物性

紙の用途とトライボロジーの関係について科学的に考察する場合、紙の構造や性質のどのような基本的物性が関与しているのかに帰納する必要がある。トライボロジーに関与する紙の物性には厚さ・密度・弾性率³⁾・曲げこわさ・粘弾性・動摩擦係数・静摩擦係数・表面粗さ^{4, 5)}・圧縮性⁶⁾などが考えられる。

紙の表面粗さの測定法に関しては、この特集で他の著者の方々が詳しく解説されている。本稿では特に紙の摩擦について解説することにする。近年、コピー機やパーソナルプリンタが普及してきたが、これらの装置には必ず一束の紙から、1枚ずつ紙を供給するための給紙装置(シートフィーダ)が装着されている。このときに複数枚の紙が重なって送られる”重走”は、使用上重大な問題となる。重走や給紙機構については本誌の以前の特集^{7, 8)}で詳しく解説されているが、それらを評価する基本的なパラメータの1つである紙間摩擦についてここでは考えることにする。

4. 紙の摩擦係数

4.1. 摩擦係数測定方法

紙間摩擦の測定に関しては、最近このような出力装置の普及と共に必要性が高まり ISO で 1999 年に規格化された。ISO 15359: 1999 Paper and board – Determination of the static and kinetic coefficients of friction – Horizontal plane method である。日本では、JIS P 8147:1994 紙及び板紙の摩擦係数試験方法があり、この規格は 1987 年に制定され 1994 年に改正された。その後 2000 年の見直しでも確認されている(内容の改正なし)。ISO 規格は、水平架台に置かれた紙とブロック状のおもりの下面に固定された紙との間に生じる静摩擦および動摩擦係数を測定する手順が規定されている。この規定では、接触部分の面積が 60 mm × 60 mm で、圧力 2.2 kPa (800 g のおもりに相当)をかけて 20 mm/s の速度で引っ張ったときの摩擦力を測定する。摩擦力をおもりによる垂直荷重で除して摩擦係数を求める。JIS 規格もほぼ同様であるが、荷重が 1.64 kPa であることと(ただし、厳密である必要がないと記述されている)引張速度を 10 mm/m (0.167 mm/s) というゆっくりした速度にしている点で異なる。この速度は通常の引張試験機を利用して摩擦力の測定が行えるように配慮しているためと考えられる。今回の実験では図 2 に示す摩擦感テスターを使用した。また、おもりの荷重が規格に合うように上に分銅を載せて測定した。

4.2. 紙の性質と摩擦係数

4.2.1. 試験用紙調製法

実験で使用した紙の試料は、市販品あるいは工場製その他、手すきによって調製した。「試験用手すき紙の調製方法」は JIS 規格⁹⁾で規定されている。乾燥したパルプシート(本実験

では広葉樹クラフトパルプ)を水に浸して離解(ミキサーで個々のパルプ繊維にまでほぐす)したあと、適度な程度に叩解(金属の刃で叩くようにせん断力を加え繊維表面を毛羽立たせ、内部を層状に剥離させることにより、繊維を膨潤させたり、繊維に柔軟性を与えたりする工程)し、希薄な懸濁液にする。本実験では PEI ミルを用いて叩解を行った。水切れの良さを示す水度は、529 ml CSF であった。これを底面に金網を置いた筒状の容器に注ぎ入れ、勢いよく脱水して金網の上にすき取る。網に残った手すき紙にろ紙を当ててクーチ(鉄のロールを転がす)を行い、さらに金属板に張り付けてからプレスし、最後に収縮が起きないように金属リングにはめ込んで乾燥する。このようにして調製した手すき紙に接触面積 1750 mm^2 (おもりの引張方向に 50 mm、幅方向に 35 mm) で、おもりが 352.6 g となる条件 (圧力 1.98 kPa) で摩擦力の測定を行った。機械ずきの紙は、繊維が配向している抄紙機の流れ方向 (MD) とそれに直行する方向 (CD) があるが、おもり側も架台側も走査方向が MD になるように試料を固定した。

4.2.2. 紙の平滑性と摩擦係数

図 3 は、製紙工場の機械で抄造された 3 層ずき上質板紙 (坪量 170 g/m^2) を用い、測定装置のおもりを引っ張りながら摩擦力の経時変化を測定した結果である。おもりを元の場所に戻しながら同一箇所を 3 回繰り返して測定した。1 回目は、最大の (静) 摩擦力を記録したあと摩擦力は徐々に減少した。おもり側の試料が連続して摩擦されることによって平滑な面へと変形していったためと考えられる。2 回目、3 回目は架台側の試料も既に平滑な面への変形が生じているため摩擦力が小さかったと考えられる。図 4 に示すように、摩擦過程での平滑化は紙の光沢度の上昇からも知ることができる。また、摩擦 1 回目の試料の変形が大きいので、摩擦 2 回目以降は、走査箇所 (時間) によらない安定した摩擦力を示した。密度の低い紙では、摩擦 1 回目に最大の摩擦力を記録したあと摩擦力が減少する割合が大きく、また摩擦回数とともに動摩擦係数も大きく減少していった。

図 5 は、図 3 のグラフに示す 60 ~ 150 秒区間の安定領域での平均摩擦力を求め、動摩擦係数を計算した結果を示す。通常のカレンダー処理 (鏡面仕上げの鉄ロールで表面を潰す処理) を行った市販品にさらに追加してカレンダー処理を行って平滑にした紙 2 種類を用いた。カレンダー線圧を上げて紙を平滑にするほど動摩擦係数は小さくなった。

図 6 は、同様に市販の中質紙 (針葉樹クラフトパルプ / 碎木パルプ (GP) / サーモメカニカルブル (TMP) = 15 / 40 / 45、坪量 74 g/m^2) にカレンダー処理を行った紙での比較である。上質紙に比べて動摩擦係数をはるかに大きく、またおもり走行中の摩擦力変動が大きかった。布などの触感では、この変動が大きいと、ざらつき感があることが分かっており¹⁰⁾、確かに中質紙の表面は、平滑度の測定値以上にざらついた感じがする。また、摩擦回数による動摩擦係数の減少は少なく、他の紙で 1 回目の摩擦試験時に観察されたように、初期の急激な摩擦力低下が観察されなかった。GP や TMP などの機械パルプの繊維は剛直であるためと考えられる。以上のようにカレンダー条件の異なる紙では、一般に平滑度の高い紙の方が動摩擦係数は低いことがわかった。

カレンダーリングは表面の平滑化と同時に高密度化する効果がある。両者の効果を区別するために、密度は同じで平滑度だけの異なる紙を手すきで調製した。目の粗さの異なるサンドペーパー（粗い方から#800、#1000 及び#1500）を紙に密着させてからプレス及び乾燥を行った。このようにして調製した紙は通常の印刷用紙に比べてかなり粗い。図 7 にサンドペーパーを当てた面どうしの動摩擦係数を通常のステンレス製プレートを当てて調製した紙と合わせて示す。凡例の数値は王研式平滑度（一定量の空気が平滑な金属面と紙表面との隙間を通して漏れ出るまでの秒数）で、数値の大きいものほど平滑である。ここでも表面の平滑な紙ほど動摩擦係数は小さくなることが分かった。ただし、#800 のように極端に粗いものは、少し動摩擦係数が下がるようである。

4.2.3. 紙の弾性率と摩擦係数

図 8 は、叩解の程度が異なる 3 種類のパルプから調製した手すき紙での比較で、ろ水度の数値（ml CSF）が低いほど叩解が進んでいる。また、高叩解度のパルプほど水中では繊維が柔軟になり、繊維どうしがシート内でよく密着するので乾燥後の紙の密度が上がり、また紙としての弾性率（超音波の伝播速度から求めた動的弾性率）が大きくなる。叩解が進むと、表面の平滑度もある程度大きくなるにもかかわらず、叩解によって緊密化した紙の方が動摩擦係数が大きくなることが分かった。繊維が堅くなることにより摩擦中の変形が少ないので滑らかに滑らなくなるためと考えられる。しかし、動摩擦係数の値を見ると、叩解度より表面粗さの影響を強く受けることがわかった。

4.2.4. 添加薬品と摩擦係数

表面の平滑性や繊維の堅さ以外にも薬品の添加により摩擦係数は異なる。内添サイズ剤（水の浸透性を制御）としてよく使用される AKD（アルキルケテンダイマー）は、紙を滑りやすくする。表面サイズ（抄紙後に行う含浸・塗工処理）によって防滑性を与えることが可能で St/AA（スチレン/アクリル酸の共重合物が酸化デンプンと共に用いられる¹¹⁾）。図 9 は、AKD の添加量を多くすると摩擦係数が低下すること、及び St/AA 系の表面サイズ処理により摩擦係数が回復することを示している。AKD は、高級脂肪酸を原料とするワックス系の物質であり、紙の中ではアルキル鎖を外に向けていると言われている¹²⁾。また St/AA 共重合体はゴム系の物質であり、防滑効果があることを示している。

4.2.5. 紙の摩擦係数に影響する因子

以上の結果から紙の摩擦係数を決定する因子をまとめて見ると、図 10 のようになる。平滑性が最も顕著に摩擦係数に影響すると考えられるが、実際の印刷用紙ではある程度平滑になっているので、その他の弾性率、密度、添加薬品の影響も大きい。その他、填料として加えられる炭酸カルシウムなどの無機物の量や紙の含水率など、ここでは考察していないが、他にも多くの因子に影響されると予想される。

5. おわりに

紙の表面特性を変える加工法として塗工^{13,15)}がある。通常の紙に無機顔料とバインダを主成分とするカラー（ペイント状の水分散液）を塗工する方法で表面の平滑性が上がる。一般に塗工紙は滑りやすいが、同じ塗工紙でも六角板状の粒子形態を持つクレーを顔料として用いるとさらに滑りやすくなる。今後コピーやレーザープリンタの高精細化にともない、塗工紙が用いられるようになると予測されるが、滑りやすい塗工紙は給紙トラブルを起こしやすく、高度化した印刷方式に対応して行くためには紙のトライボロジーが必須の分野となっていくと思われる。

参考文献

- 1) Kuo, L.-S. & Cheng, Y.-L.: "Effects of creping conditions on surface softness of tissue paper – application of sled method", Tappi Journal, 83,12 (2000) 62
- 2) 内田洋介・見須浩一・岩崎誠: "紙の手触り感を予測する方法について", 繊維学会予稿集(G), (1996) G-88
- 3) カンタヤーヌウォン ソムワン・江前敏晴・尾鍋史彦: "超音波顕微鏡を用いたパルプ繊維壁の弾性係数測定", 紙パ技協誌, 55, 5 (2001) 173-177
- 4) Enomae, T. & Onabe, F.: "Characteristics of Parker Print Surf roughness as compared with Bekk Smoothness", Sen'i Gakkaishi, 53, 3 (1997) 86-95
- 5) Enomae, T., Ishida, S., Onabe, F., & Usuda, M., "Characterization of air-leak smoothness of paper by analysis of correlation", Sen'i Gakkaishi 48, 9 (1992) 493-500
- 6) 佐々木潔・江前敏晴・尾鍋史彦・金鳳庸: "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", 紙パ技協誌, 54, 5 (2000) 685-692
- 7) 岡山正男: "柔軟媒体の送り機構とトライボロジー", トライボロジスト, 42, 5 (1997) 321
- 8) 服部俊介: "紙学のすすめ-柔軟媒体ハンドリング機構とそのシミュレーション", トライボロジスト, 42, 5 (1997) 339
- 9) 日本工業規格 JIS P 8222 (1998)
- 10) 近藤智吏: "不織布・紙の快適性評価とその最近の測定機", 紙パルプ技術タイムス, 31, 5 (1988) 44
- 11) 木村進一: "サイズプレス用薬品", 製紙薬品の最前線—プロセスの最適化と製品の高品質化をめざして—, 繊維学会紙パルプシンポジウム, 繊維学会紙パルプ研究委員会, (1996) 97
- 12) 磯貝明: セルロースの材料科学, 東京大学出版会, (2001) 88

- 13) 大籠幸治・江前敏晴・尾鍋史彦: "塗工紙の曲げこわさの評価法と制御", 紙パ技協誌, 51, 4 (1997) 635
- 14) 桑村五郎・早野三郎・高野弘二・鎌田一則・江前敏晴・尾鍋史彦: "塗工層の構造解析", 紙パ技協誌, 52, 2 (1998) 19
- 15) 早野三郎・高野弘二・鎌田一則・寺元学・江前敏晴・尾鍋史彦: "塗工層の構造解析()", 紙パ技協誌, 53, 8 (1999) 47

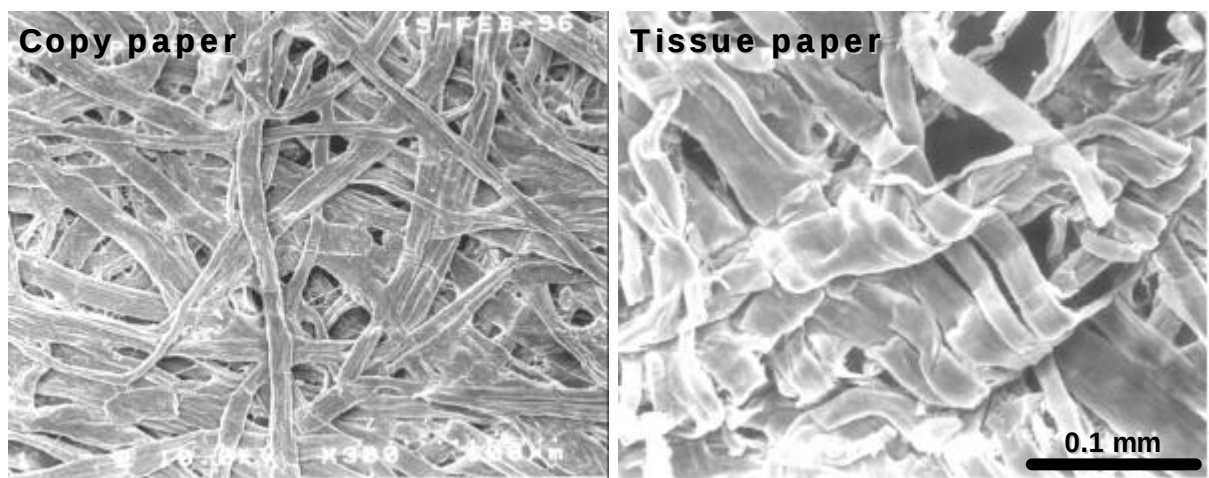


Fig.1 Scanning electron micrographs of copy paper and tissue paper

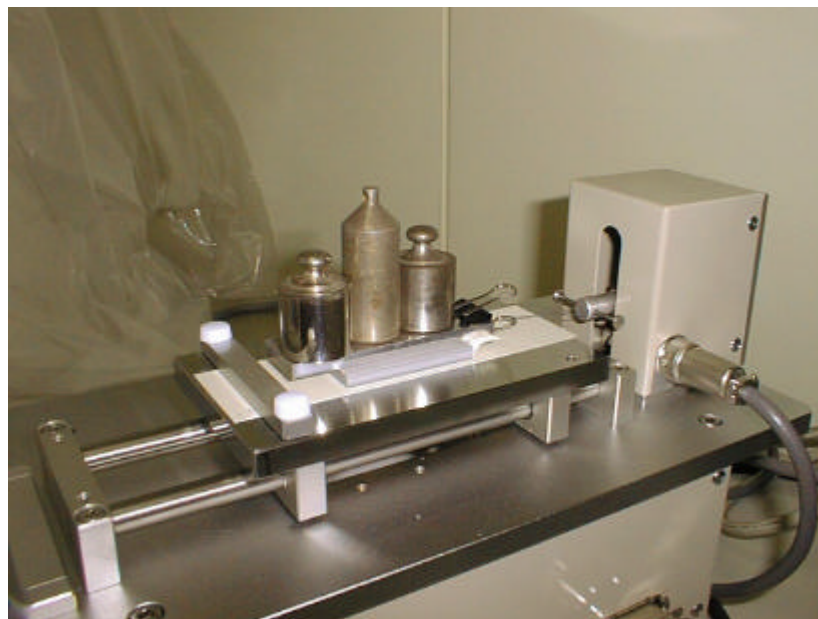


Fig.2 Friction tester with sample setting modified for paper

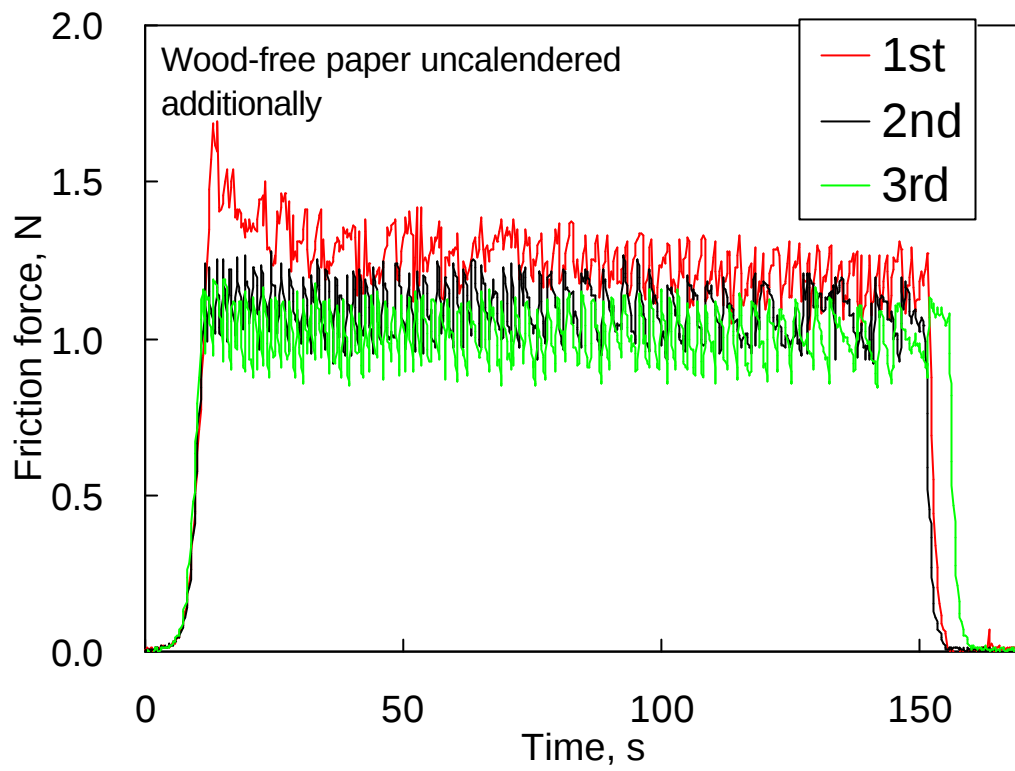


Fig.3 Change in friction force with time for three sled slides

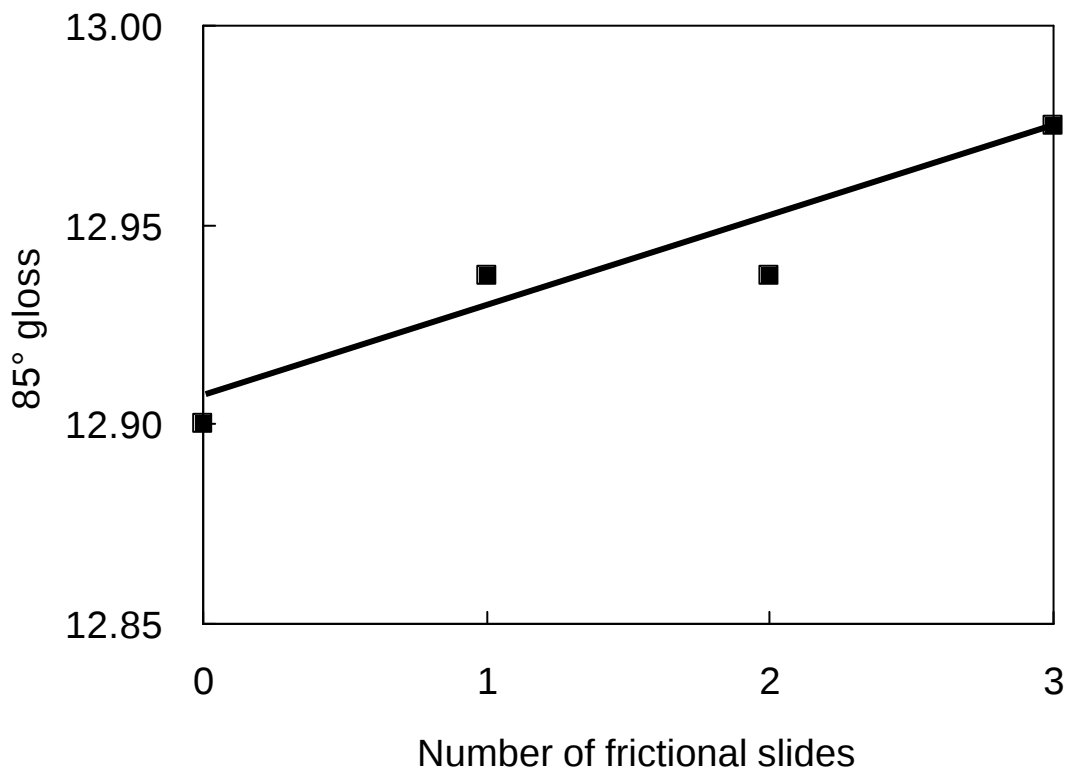


Fig.4 Gloss increase with sled slides

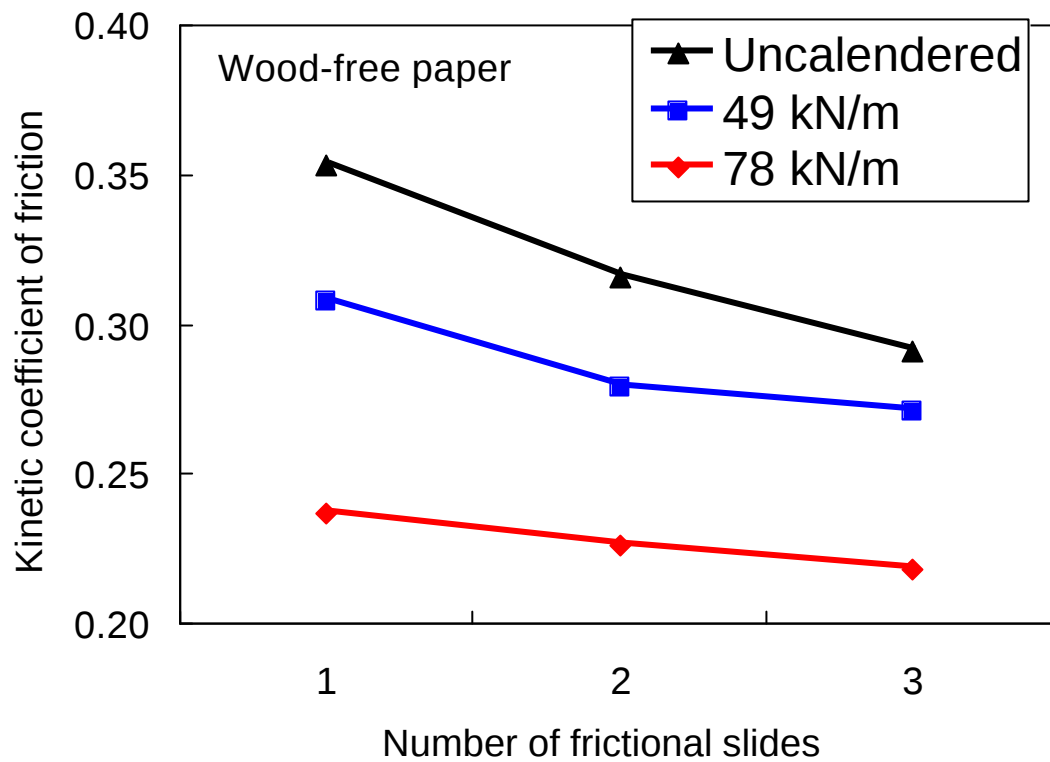


Fig.5 Calendaring effect on friction for wood-free paperboard

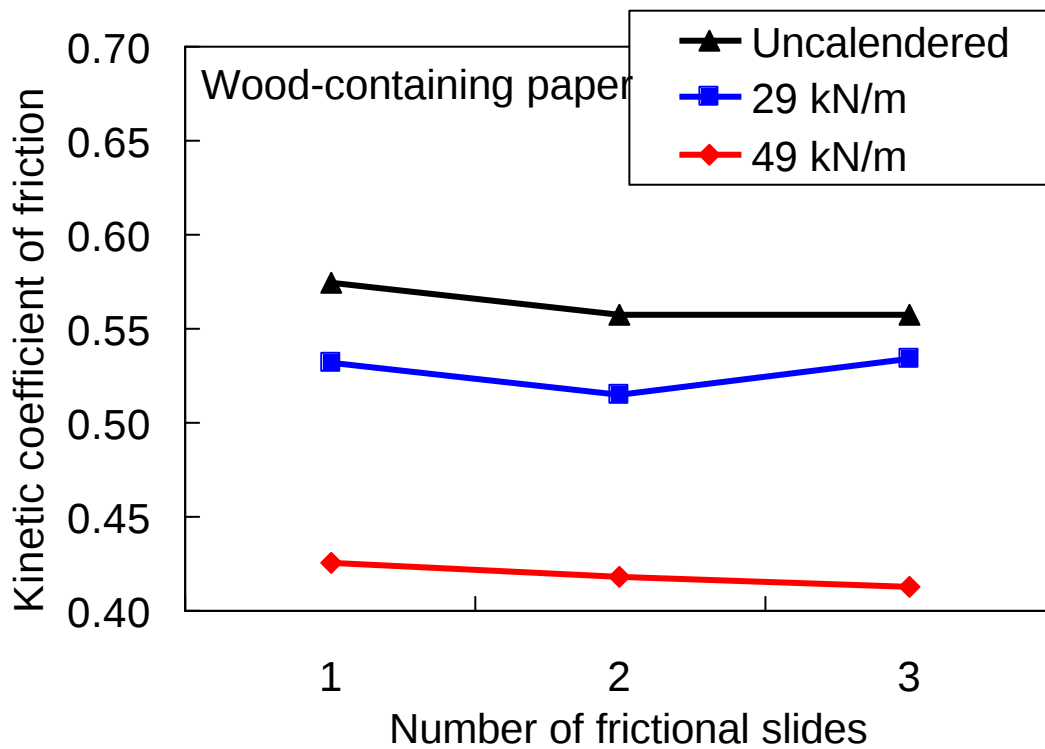


Fig.6 Calendaring effect on friction for wood-containing paper

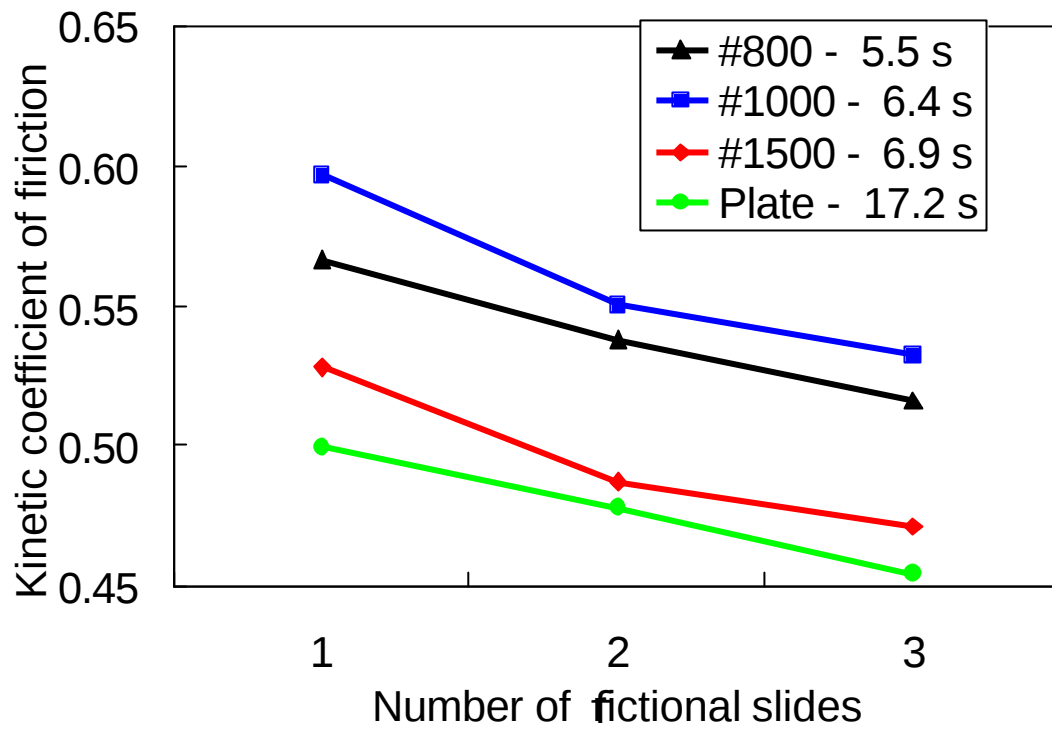


Fig.7 Smoothness effect on friction for sandpaper molded handsheets

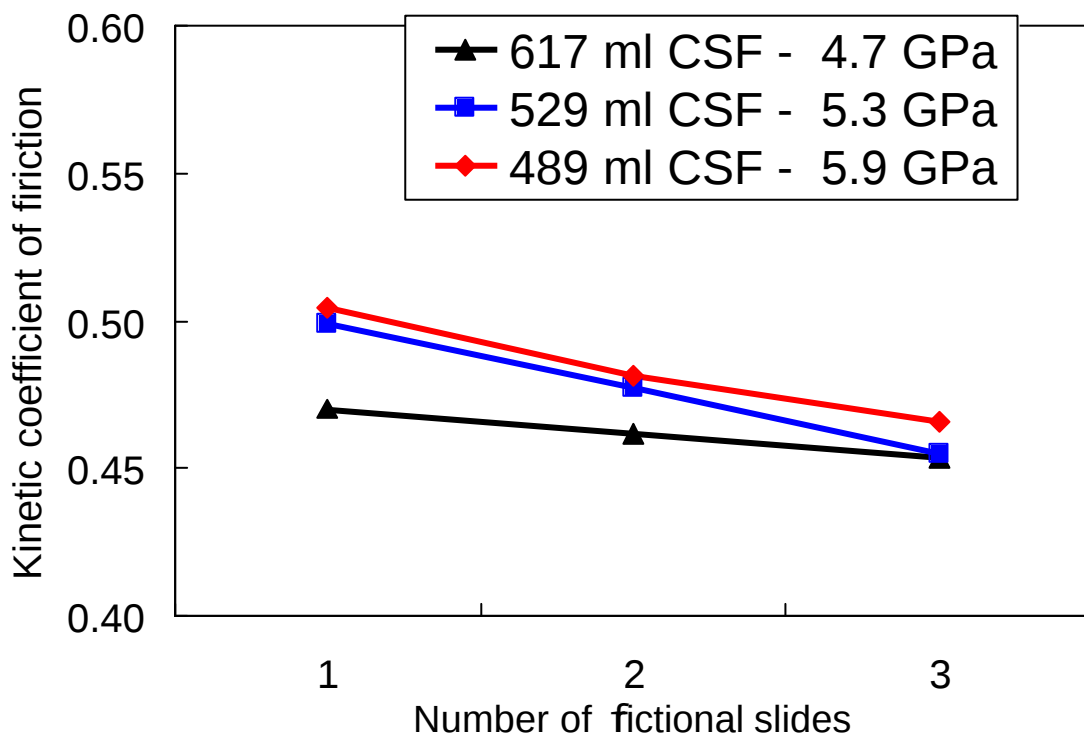


Fig.8 Beating effect on friction for handsheets

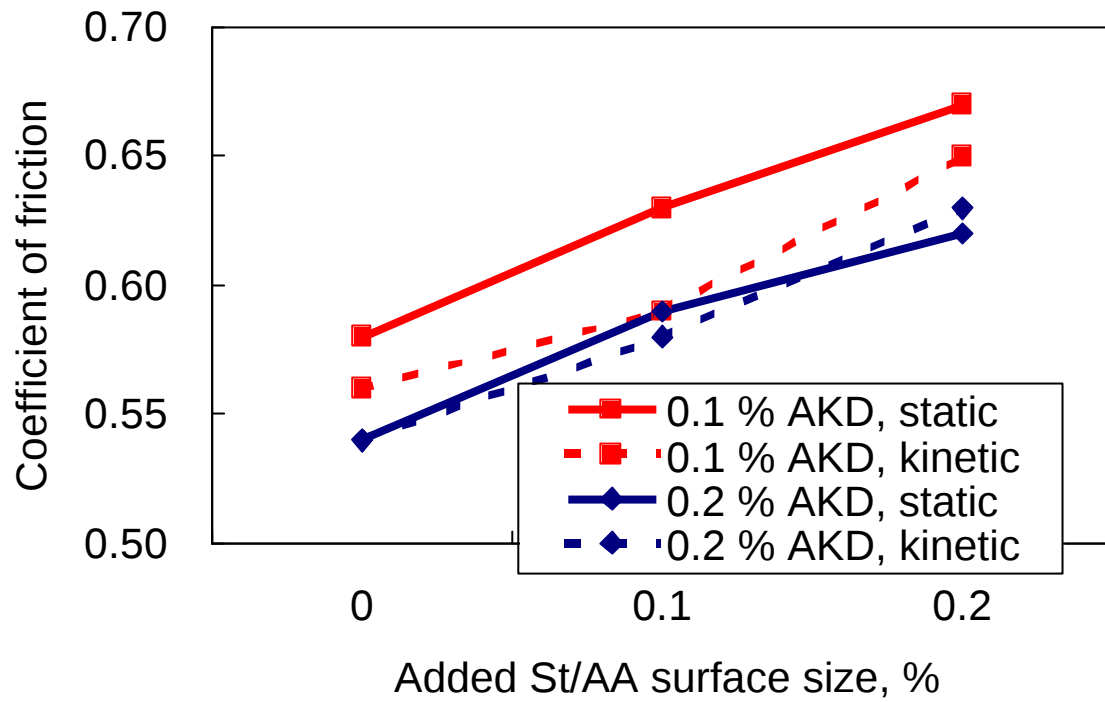


Fig.9 Additives effect on friction for machine-made paper

[出典: 文献 11]のデータから作成]

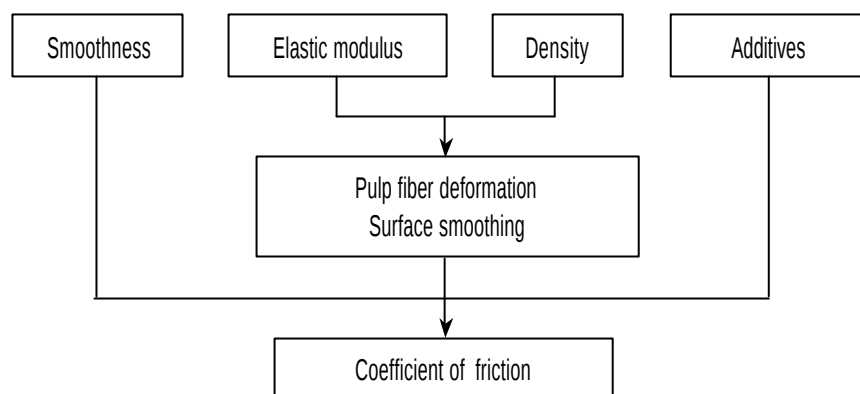


Fig.10 Paper properties affecting coefficient of friction