紙のライブリネス 第2報

—ライブリネスに影響を及ぼす種々の因子*¹—

三田工業㈱ 加藤 護

東京大学農学部 内藤 勉*², 臼田誠人, 門屋 卓

Liveliness of Paper

II. Effect of Various Factors on Liveliness*¹

Mamoru Kato

Mita Industrial Co., Ltd., 1-2-28 Tamatsukuri, Higashiku, Osaka 540

Tsutomu Naito*², Makoto Usuda, Takashi Kadoya

Faculty of Agriculture, The University of Tokyo, Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113

In the previous paper, the apparatus developed in our laboratory for measuring liveliness of paper was described. It was shown that under the standard condition the liveliness has a good correlation with the bending stiffness EI (E: Young's modulus, I: moment of inertia).

This paper discusses the relationship between the liveliness and the calculated EI for the commercial xerography papers. Below 65% of relative humidity, the response of paper to strain is similar to that of elastic body. The liveliness of paper decreases with the increase in the moisture content and is proportional to the calculated EI and Gurley's rigidity.

On the other hand, in the range of higher relative humidity, bending causes permanent deformation in the sheet structure, and the deformation depends on the bending time during the measurement of the liveliness. These findings reveal that the repeated measurement of liveliness is more suitable than the conventional bending tester for evaluation of the practical bending property, which is closely related to feeding properties of xerography paper under the circumstances of high humidities.

Keywords: Liveliness · Young's modulus · Inertia · Commercial xerography papers · Relative humidity · Strains · Gurley's rigidity

1. 緒 言

前報¹⁾で、紙の瞬間曲げ回復性の測定方法を確立し、ライブリネスは、曲げ回復時間(t)の2乗の逆数($1/t^2$)と定義した。さらに市販上質紙、中質紙、新聞用紙等(坪量 43~120 g/m², 厚さ 45~200 μ m)を用いた解析結果より、シートが弾性体に近い挙動を示す領域において、ライブリネスは曲げこわさ(EI)と比例関係にあることを明らかにした。

但し E : 曲げヤング率 I : 断面二次モーメント $EI \propto K/t^2 \dots \dots (1)$ K : 慣性モーメント t : 曲げ回復時間 $1/t^2$: ライブリネス

一方、紙のこわさは、その加工および製品の用途において、重要な性質である。それ故これまでに種々のこわさ試験機が考案され実用化されている。さらに各試験機での力学的意義を解析し、紙の基礎的性質との

*¹ 本研究の結果の一部は、第49回紙パルプ研究発表会で発表した。*² 現在、十条製紙株式会社 Present Address: Jujo paper Co., Ltd., 5-21-1 Oji, Kitaku, Tokyo, 114

相関性²⁾³⁾、各試験機での測定値間の相関性⁴⁾⁵⁾について検討されている。しかしこれらの試験機は、いずれも静的なこわさの測定方法であるため、これら試験機での測定結果と実用時のシートの曲げ特性（たとえば複写機での転写紙の曲げによる給紙特性）とが、対応しないことを我々はしばしば経験する。

本研究は前報で確立した、紙のライブリネスの測定法に基づき、坪量の異なる市販 xerography 用紙を用い、試料の相対湿度、円筒へのシートの曲げ保持時間を変化させ、ライブリネスの支配因子である E および I の影響度、繰返し曲げによる曲げ回復性の検討、さらに市販曲げこわさ試験機での静的なこわさの測定値とライブリネスとの対応について検討した。

2. 実験

2.1 試料および試料の調製

市販の坪量 60~85 g/m² の xerography 用紙 15 種類を所定の飽和塩溶液を用いて調湿した。試料は異方性が認められたため、抄紙方向 (MD)、横方向 (CD) に分けた。なお、紙片は前報と同じく幅 5 cm、スパン長 13.5 cm とした。

2.2 ライブリネスの測定条件

前報で確立した測定装置を用いた。なお、円筒への紙片の曲げ保持時間は 1, 10, 30, 60, 150, 300 sec とした。

2.3 ヤング率の測定方法および測定条件

所定の飽和塩溶液を用いて調湿した試料を、ポリエチレン袋にいれ、密閉したのち定速引張試験機により、シートの荷重-伸び曲線を求め、この曲線の初期こう配よりヤング率を求めた。なお、紙片は幅 1.5 cm、スパン長 10 cm、引張速度 4 mm/min とした。

2.4 紙厚の測定方法及び測定条件

試料を水銀中へ沈め、その浮力を測定することにより試料体積を求め、次いで平均厚さを求める水銀浮力法⁶⁾⁷⁾より算出した。なお、紙片は 6×3 cm とした。

2.5 ガーレこわさの測定および測定条件

ガーレこわさの測定は標準法⁵⁾に基づき標準試験片を用いた時のこわさとして表示した。なお試験片は幅 2.54 cm、長さ 8.89 cm とした。

2.6 繊維配向度係数の測定方法及び測定条件

20°C, 65% R. H. でのシートのヤング率を 2.3 の方法で求め、MD/CD のヤング率の比をシートの繊維配向度係数とした。

3. 結果および考察

3.1 紙のライブリネスの相対湿度依存性

前報で紙のライブリネスは、曲げこわさ EI とよく対応することを報告した。ここではシートの含水率を調整し、ライブリネスの相対湿度依存性を検討した。

本実験で用いた試料は、市販 xerography 用紙であるため、パルプの種類、叩解度、填料の種類およびその配合比、抄紙条件等すべて異なるものと思われる。そこでまず、シートの坪量、紙厚、密度、ヤング率、繊維配向度係数を求め、シート密度、繊維配向度係数を一定とした時の紙厚のライブリネスへの影響、坪量を一定とした時の紙厚のライブリネスへの影響を検討するため、シートを次の 3 種類に分類し以下の考察を行った。

S1: 密度、繊維配向度係数が近似した試料で、坪量、紙厚の異なるシート。

S2: 坪量が近似した試料で、密度、紙厚の異なるシート。

S3: その他

表 1 に紙質測定結果を示す。

まず、シートのヤング率の相対湿度依存性について検討した。図 1 に S1 シートでの結果を示す。図 1 よりシートの MD, CD のヤング率は、いずれも 25~65% R. H. 下において一定である（以下シートのヤング率とは特にことわりのないかぎり MD, CD 両者のヤング率を意味する）。しかし、65% R. H. 以上では顕著に低下している。特に 92% R. H. でのシートのヤング率は、65% R. H. でのそれと比較すると、MD シートで 1/3~1/4, CD シートで約 1/2 に低下している。この原因は明白なため、ここでは省略する。

S2 シートについては、シート密度の増加にともない、みかけのヤング率は増加するが、高相対湿度では、シート密度のヤング率への影響は小さいことが確認された。

図 2, 3 に S1, S2 シートのライブリネスの相対湿度依存性を示す。図 2 より低坪量 MD シート（坪量 65 g/m² 以下）およびすべての CD シートのライブリネスは、図 1 のヤング率と同様、相対湿度 25~65% の領域において、一定であり、80% 以上で顕著に低下している。しかし、高坪量 MD シート（たとえば a, b）では、相対湿度の増加とともに、ライブリネスは低下している。原因は本実験ではシートを一定曲率半径 (4.20 cm) に曲げているため、シートに加えられる外力は高坪量シートほど大きい。その結果含水率が増加すると、大きな外力を加えられたシートは、せん断によりシート構造にゆらみが発生しやすいと思われる。

S2 のシートにおいては、密度の増加にしたがいヤング率は大きくなるが、逆にライブリネスは低下して

Table 1 Physical properties of commercial xerography papers at 20°C, 65% R. H.

Sample name	Basis weight g/m ²	Thickness μm	Apparent density g/cm ³	Young's modulus		Fiber orientation M. D/C. D	Class
				M. D GPa	C. D GPa		
a	79.7	97	0.82	4.5	2.2	2.1	S1
b	74.0	90	0.82	4.2	1.9	2.2	
c	64.9	80	0.81	5.6	2.5	2.2	
d	60.0	75	0.81	5.0	2.3	2.2	
e	74.8	92	0.81	4.5	2.2	2.1	S2
f	75.8	89	0.85	4.8	2.0	2.4	
g	73.8	83	0.89	5.0	3.1	1.6	
h	63.9	71	0.90	5.9	2.6	2.3	S3
i	73.2	90	0.81	4.3	2.7	1.6	
j	75.8	89	0.85	4.8	2.2	2.4	
k	75.1	91	0.83	5.3	2.2	2.4	
l	78.1	97	0.81	4.3	1.5	2.9	
m	82.3	93	0.88	4.7	2.5	1.9	
n	80.8	95	0.85	6.3	2.8	2.3	
o	81.1	100	0.81	5.2	2.2	2.4

Fig. 1 Variation of Young's modulus with relative humidity for sheets of S1 group **Fig. 2** Variation of liveliness with relative humidity for sheets of S1 group

いる。このことより同一坪量では、シートのライブリネスは紙厚の影響が大きいことが確認できた。

3.2 円筒へのシートの曲げ保持時間のライブリネスへの影響

前報および 3.1 では、シートの瞬間曲げ回復性をライブリネスと定義した。換言するとシートに与える初期ひずみは、紙片の円筒への曲げ保持時間を 1 sec と限定していた。

Fig. 3 Variation of liveliness with relative humidity for sheets of S2 group

ここではライブリネスを広義に解釈し、シートの曲げ回復性をライブリネスと定義し、シートの曲げ保持時間を変化させた時のライブリネスについて検討する。なお、従来のライブリネスの定義と混乱しないよう、シートの曲げ保持時間が1 sec 以外の場合は「ライブリネス」のあとに曲げ保持時間を記入する。

図2, 4および5に S1 シートについて、円筒へのシートの曲げ保持時間を1, 10, 60 sec と変化させた時のシートのライブリネス (1, 10, 60) の相対湿度依存性を示す。シートの曲げ保持時間10 sec 以下の条件では、シートに発生した初期ひずみの曲げ時間の影響は少なく、ライブリネス (1, 10) の変化は小さい。

しかし、シートの曲げ保持時間を60 sec (図5) と長くすると、高相対湿度 (80%以上) では、円筒へのシートの曲げ保持時間のライブリネスへの影響は極めて大きい。

特に92% R. H. では、すべてのCD シートは永久変形し、ライブリネス (60) は測定不可能であった。原因はシートのヤング率の顕著な低下およびシート構造の変化による永久ひずみのためと思われる。

写真1に20°C, 92% R. H. での、試料dのストロボスコープによるライブリネス (60) の回復軌跡を示す。なお、1コマは25 ms とした。写真よりシートの永久変形が観察された。

Fig. 4 Variation of liveliness with relative humidity for sheets of S1 group
Bending time (B. T.)=10 seconds

Photo. 1 Observation of liveliness at 20°C, 92% R.H.
by stroboscope: Sampled, CD sheet
Bending time (B. T.)=60 s cods

以上の結果より本実験条件下では円筒へのシートの曲げ保持時間を10 sec 以下に限定すると、シートはほぼ弾性体的挙動を示す。その結果EIとライブリネスがよく対応するものと思われる。

3.3 E 及び I のライブリネスへの影響度

シートのE及びIを個々に実測し、式(1)で示した計算によるこわさEIを算出し、E及びIのライブリ

Fig. 5 Variation of liveness with relative humidity for sheets of SI group
Bending time (B. T.) = 60 seconds

Fig. 6 Liveness vs. Young's modulus compared at the same thickness

ネスへの影響度を検討した。

図6にシートの厚さを一定とした時のシートのヤング率とライブリネスの相関性を示す。なお、シートの

Fig. 7 Liveness vs. (thickness)³ compared at the same Young's modulus

ヤング率は、試料の含水率を変化させることにより調整した。シートの紙厚は表1に示した試料の紙厚の差が2 μm以下の試料を同一グループとした。また、シートの厚さは含水率の変化による影響が小さいと思われるため各含水率でのシートの厚さは、20°C, 65% R. H.での紙厚を用いた。図6よりシートのヤング率の低下にともない、ライブリネスは低下している。しかし、いずれの紙厚においても、両者の相関性は高い。

図7にシートのヤング率を一定とした時の(厚さ)³とライブリネスの相関性を示す。なお、x軸の(厚さ)³に定数(試料幅/12)を乗ずるとシートの断面二次モーメントが求められる。なお、図7でのシートのヤング率は、試料の含水率を変化させることにより調整し、ヤング率の差が0.3 GPa以下の試料を同一グループとした。また、シートの(厚さ)³は表1より求めた。回帰分析結果より5 GPaとシートのヤング率が大きい試料では、両者の相関性は高い($r=0.949$)がEの小さい試料、たとえば1 GPaの試料では両者の相関性は低下した($r=0.796$)。原因は本実験では曲率半径が一定であるため、Eの小さい試料は与えたひずみにより永久変形しやすいと思われる。

次に20°C, 65% R. H., 92% R. H.における円筒への曲げ保持時間を1, 60, 300 secとした時、実測によるE及びIより求めた計算によるこわさEIと、ライ

Fig. 8 Relationship between liveliness and EI
EI is calculated from Young's modulus and moment of inertia of the cross section for sheets at 20°C, 65% R. H.

Fig. 9 Relationship between liveliness and EI at 20°C, 92% R. H.

ブリネス (1, 60, 300) の相関性を図 8, 9 に示す。相対湿度 65% では、シートはほぼ弾性体に近い挙動を示すため、両者の相関性は極めて高い。また、シートの曲げ保持時間の両者への影響は小さい。しかし、図 9 で示されるように高相対湿度 (92%) では、シートの曲げ保持時間のライブリネスへの影響は極めて大きい。その結果 EI とライブリネス (60, 300) の相関性は顕著に低下している。特に EI が $5 \mu\text{Nm}^2$ 以下の領域では、ライブリネス (60) と無相関であった。

以上の結果より、紙のライブリネスは、シートがほぼ弾性体として作用する領域では、計算による EI に比例する。また、E の影響が顕著である。しかし、シートが弾性体の挙動を示さない、上記以外の領域では、紙のライブリネスは円筒へのシートの曲げ保持時間、換言するとシートに発生した初期ひずみの曲げ時間依存性により決定される。したがって、この領域での紙のライブリネスは、シートの繰り返し曲げによる疲労特性の検討が必要である。

3.4 繰り返し曲げによる曲げ回復性

シートの疲労特性を検討するため、繰り返し曲げ試験を行い、そのライブリネス (10) およびシートが永久変形するまでの繰り返し曲げ可能回数を測定した。図 10 に相対湿度 65%, 92% における、S1, CD シートの繰り返し曲げによる曲げ回復時間を示す。65%

Fig. 10 Variation of recovery time with number of bending for sheets at 20°C, 65% R. H., 92% R. H.
Bending time (B.T.) = 10 seconds

Table 2 Characteristics of sheets at 20°C, 92% R. H.

Sample name	Moment of inertia fm ⁴	Young's modulus GPa	Stiffness μNm ²	Recovery time ms	Liveliness sec ⁻²	NB*2
a	3.7	1.00	3.7	516	3.8	5
b	3.0	0.56	1.7	640	2.5	3
c	2.1	0.92	1.9	550	3.2	9
d	1.8	0.69	1.2	--*1	--	1
e	3.2	1.80	5.8	328	9.3	10<
f	2.9	1.90	5.6	400	6.3	10 M. D
g	2.3	2.20	5.1	356	7.9	10<

*1—Permanent deformation.

*2—Critical number of before permanent deformation.

Fig. 11 Relationship between liveliness and Gurley's rigidity at 20°C, 65% R.H.

R. H. では、シートは繰り返し曲げによる疲労は極めて小さい。すなわちシートはほぼ弾性体として応答している。しかし 92% R. H. では、いずれの CD シートも 10 回以下の繰り返し曲げにより永久変形した。

表 2 に 92% R. H. での S1 CD シート, S2 MD シートの力学特性および繰り返し曲げによる、曲げ回復特性を示す。図 10 および表 2 により、シートの繰り返し曲げによるライブリネス (10) は、初回のみシートに与えた初期ひずみと、計算によるこわさ EI は対応した。しかし、2 回目以降のライブリネス (10) およびシートが永久変形するまでの繰り返し曲げ可能回

Fig. 12 Relationship between liveliness and Gurley's rigidity at 20°C, 92% R.H.

数は、実測による E , I および計算によるこわさ EI との相関性は認められなかった。すなわち、2 回目以降のライブリネス (10) は前回までの曲げによりシートに生じたひずみにより決定されるものと思われる。このようにシートのクリープ特性を測定することにより、市販の静的なこわさ試験機による静的なこわさの測定結果と、実用時のシートの曲げ特性が対応しないことが起こりうることを示唆している。

3.5 ライブリネスとガーレこわさの対応

市販の静的なこわさ試験機として、Gurley's softness tester を用い、紙のライブリネスが既存のこわさ試験機での測定値と対応するか否かを検討した。

図 11, 12 に両者の相関性を示す。図 11 よりシートがほぼ弾性体として作用する 相対湿度 65% では、紙のライブリネス (1, 60, 300) は 3.3 で検討した計算による EI と同様ガーレかたさとよく対応した。しかし、92% R. H. (図 12) では、紙のライブリネス (1, 60) はシートの曲げ保持時間により大きく変化する。図 12 より円筒へのシート曲げ保持時間 1 sec では、ライブリネスとガーレかたさは高い相関性が得られた (◎印)。しかし、シートの曲げ保持時間 60 sec では両者の相関性は顕著に低下した (●印)。但し、シートのこわさが大きい領域、換言すると E が大きい領域ではライブリネス (1, 60) とガーレかたさは高い相関性が得られた。しかし、 E の低下にともない両者の相関性は低下した。特にガーレかたさが 50 mg 以下の領域では両者は無相関であった。

以上の結果よりガーレかたさとは、シートを弾性体と仮定した測定方法であり、かつシートに与える初期ひずみの小さい小曲げ変形を利用した測定方法であることが確認された。したがって、高相対湿度における実用時の紙の曲げ特性、たとえば複写機での転写紙の曲げ (大変形) による給紙特性は静的なこわさ試験機を用いた測定では把握できないことが起こるものと思われる。ちなみに、三田工業 (株) 製 P. P. C DC-161 を用いて、20°C, 85% R. H. において表 2 に示したシートの給紙性を確認した。なお、以下に述べる給紙不良とは、シートをカセットにいれ上記対湿度で 24 時間調湿したのち、複写する際給紙部においてシートを曲げたことにより発生した不良に限定した。

実験結果より給紙不良発生頻度は、 $b > a > d > c, f > e, g$ の順であった。一方、シートのこわさは表 2 より $a > b > c > d, e > f > g$ の順であり給紙性の良否と対応しない。しかし、シートのクリープ特性である繰返し曲げ試験により、シートが永久変形するまでの繰返し曲げ可能回数は、 $c > a > b, e, g > f$ の順であり給紙性の良否とよく対応した。なお、試料 d は初回に与えたひずみにより永久変形した。

以上の結果より装置の曲率半径を選択しシートに与える初期ひずみを調整し、そのライブリネスを測定することにより、より正確な紙の曲げ特性が把握できることが示唆された。

4. ま と め

紙のライブリネスについて、市販 xerography 用紙を中心に検討を行い以下の結論を得た。

1) 相対湿度 65% 以下の領域では紙のライブリネスは、

(1) 計算によるこわさ EI とよく対応した。

(2) 静的なこわさであるガーレかたさとよく対応した。

(3) シートに与える初期ひずみの影響は小さい。

2) 高相対湿度領域では、シートに与えるひずみからの回復性は曲げ時間依存性が顕著なため、紙のライブリネスは、

(1) 繰返し曲げ試験での曲げ回復性のようなシートの疲労特性の測定が必要である。

(2) 繰返し曲げ回復性は初回のみ EI で規定されるが、2回目以降のライブリネスはシートに発生したひずみにより決定される。

(3) 繰返し曲げ試験での曲げ回復性の測定結果と実用時のシートの曲げ特性、たとえば複写機での給紙性の良否とよく対応した。

3) シートに与える初期ひずみを調整することにより紙のライブリネスは、静的なこわさおよび実用性を考慮したこわさの両者を測定可能である。

引 用 文 献

- 1) 内藤, 加藤, 白田, 門屋: 紙パ技協誌, 投稿中
- 2) 小田, 門屋, 白田, 木村: 紙パ技協誌, Vol 33, No. 3, 214, 1979
- 3) 小田, 門屋, 白田, 木村: 紙パ技協誌, Vol 33, No. 4, 302, 1979
- 4) H. W. Verseput: Tappi, Vol 52, No. 6, 1136, 1969
- 5) 鈴木文四郎: 紙パ技協誌, Vol 14, 107, 29, 1960
- 6) R. B. Wasser: Tappi Vol 57, No. 3, 166, 1974
- 7) 木村, 小田, 岩崎, 門屋: 第28回日本木材学会研究発表要旨集, 100, 1978
- 8) 紙パルプの種類とその試験法: 紙パルプ技術協会発行, 191, 1969

(受理 57. 10. 9)