

パルプおよび製紙に関する研究

第21報 紙の透気度についての基礎的実験 (5)

製紙研究室 寺谷文之・木村良次

(昭和35年6月1日受理)

Fumiyuki TERATANI and Yoshitsugu KIMURA : Studies on Pulp and Paper-making. (XXI) Fundamental Experiments on the Air Resistance of Paper.

緒 言

パルプの物理的、化学的処理が紙の透気性に与える影響について実験を続けてきたが、これらの実験を通じて特に多孔質な紙の場合、通常の Gurley densometer では透気度の測定が不正確あるいは不可能な場合がしばしば起つた。そのため densometer の部分的な改変が必要となり、本報ではこの改造された densometer を使用して多孔質な紙の透気度の測定を行つた。また最も基本的な手抄試験紙の作成条件に関する実験を通じて、紙の透気度に関係ある因子を中心とした考察を行い、更に湿紙に対する圧縮力が紙の物理的諸性質に与える影響について実験した結果を報告する。

結果および考察

I. 透気度測定用 densometer について

通常の Gurley densometer は空気 100ml の通過時間が 2~1800秒の紙の透気度を測定する場合に適用されるものである (JIS p8117)。しかし非常に多孔質な紙の場合は規定の 2秒以下の速さを示すことがしばしばおこる。かかる試片の透気度測定の一方法として、試片を数枚重ね合せて測定し 1枚当りに換算していたが¹⁾、この方法においても挿入する試片の厚さに制限がある。従つてこれ以外の方法として densometer 内筒の重量を軽くし、また空気の通過面積を小さくして通過時間を延長せしめることが考えられる。かかる原理に基づいて試作した軽量内筒の性状を Table 1 に示す。原内筒に比較して、空気通過孔の面積は約 1/8、重量は約 1/3 である。

この改造内筒を使用し、内筒に加わる荷重を変化して透気性を測定した所、Table 2 の如き結果を得た。用いた試料は市販の未晒硫酸塩パルプ (UBKP) を 15% NaOH 溶液に浸漬処理したパルプ (A-UBKP) を所定の freeness まで叩解したもの、および晒亜硫酸パルプ (BSP) を叩解したものから、公定法に準じて作成した手抄試験紙である。

試片に対する両面の空気の圧力差と透気度の関係を対数図にて示すと、Fig. 1 の如き直線関係を得た。密度の異なる 4種の紙の透気度の絶対値はことなるが、圧力差の変化に対してはほぼ同一の勾配を示すので、各直線について実験式を求めた。

Table 1. Comparison of inner cylinders of densometer

	Original cylinder	modified cylinder
pore for air passage		
diameter, <i>mm</i>	26.8	9.6
area, <i>mm</i> ²	564.1	72.4
weight, <i>g</i>	568.5	196.9
outside diameter, <i>mm</i>	76.1	76.1
inside diameter, <i>mm</i>	74.1	75.5
average floating power, <i>g</i>	11.43	3.43
inner pressure, <i>g/cm</i> ²	12.92	4.32

Table 2. Effect of air pressure of densometer on the air resistance of paper.

sample No.	freeness <i>ml</i>	basis weight <i>g/cm</i> ²	density <i>g/cm</i> ³	air resistance, <i>sec./dl.</i>			
				pressure of 4.32 <i>g/cm</i> ²	pressure of 6.34 <i>g/cm</i> ²	pressure of 12.05 <i>g/cm</i> ²	pressure of 14.00 <i>g/cm</i> ²
A-UBKP ^a 3	730	61.3	0.43	20.1	14.3	7.6	6.8
" 4	625	61.3	0.44	59.2	42.0	21.2	18.4
" 5	440	63.7	0.47	206	142	73.8	65.2
BSP ^b 2	835	67.5	0.60	62.9	43.5	22.6	18.6

a : Unbleached krabt pulp treated with 15% NaOH

b : Bleached sulfite pulp

Line No. in Fig. 1

Experimental Formula

1 $\log AR = 2.943 - 0.989 \log p$

2 $\log AR = 2.457 - 1.028 \log p$

3 $\log AR = 2.416 - 1.003 \log p$

4 $\log AR = 1.928 - 0.966 \log p$

note : AR = air resistance (sec/dl), p = pressure (g/cm^2)

各直線について上記の如き実験式を得たが、各直線の勾配の平均は -0.997 である。一般的に粘性流体の流出率は圧力差に比例するという Darcy の法則、細管中の流体に関する Poiseuille の法則および空気の如き圧縮性流体でも流れの両端における圧力差が流体に対する圧力に比して十分に小さい場合は、非圧縮性流体に準じて取扱い得ることを考えるならば、Fig. 1 における各直線の勾配は殆ど -1 であると推定して差支へないであろう。

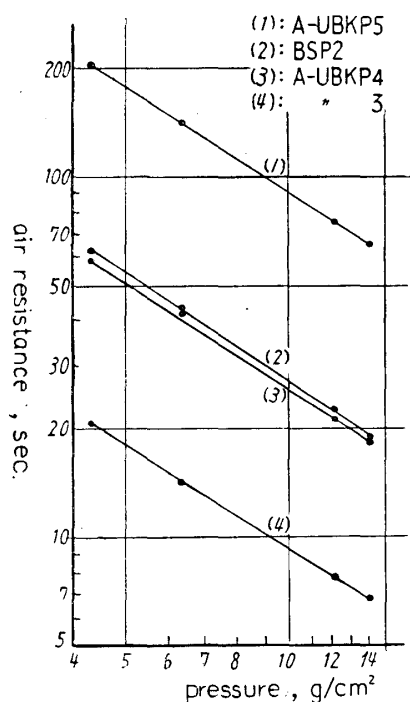


Fig. 1. Relation of air pressure in densimeter to the air resistance of paper.

次に原内筒と改造内筒による両測定値間の関係を求めるため、原内筒を使用した場合の試片に対する圧力差を p_0 、空気通過面積を a_0 、透気度を AR_0 とする。同様に改造内筒を使用した場合をそれぞれ p_m 、 a_m 、 AR_m とする。紙の場合空気の流出率はその通過面積に比例すると考えられるゆえ、両透気度の比は次式によって表される。

$$\frac{AR_m}{AR_0} = \left(\frac{p_0}{p_m} \right)^{0.997} \times \frac{a_0}{a_m} \dots\dots\dots(1)$$

(1) 式に Table 1 に示した値をそれぞれ代入して計算すると $\frac{AR_m}{AR_0} = 23.0$ となる。

実際に BSP 及びアルカリ浸漬した UBKP から作った試験紙について、両内筒で透気度を測定した結果は Table 3 に示される。両透気度の比を見るに $\frac{M-AR}{O-AR} = 22.5$ なる平均値を得た。従つて前述の計算値に対する差はわずか 2.2% である。

以上を総括すれば、試作せる軽量内筒は通常の

Table 3. Comparison of air resistances measured by original and modified cylinder.

sample No.	freeness ml.	basis weight g/m ²	density g/cm ³	air resistance		$\frac{M-AR}{O-AR}$
				O-AR ^a sec./dl	M-AR ^b sec./dl	
BSP 1	835	31.2	0.61	0.74	17.2	23.2
" 2	"	67.5	0.60	2.78	65.9	23.8
" 3	"	136	0.59	9.13	198	21.7
" 4	"	204	0.58	14.6	312	21.4
" 5	"	271	0.61	19.9	—	—
" 6	"	379	0.62	30.8	—	—
A-UBKP 1	885	55.0	0.28	—	3.23	—
" 2	815	58.7	0.37	0.30	7.11	23.7
" 3	730	61.3	0.43	1.00	21.1	21.1
" 4	625	61.3	0.44	2.42	60.4	24.8
" 5	440	63.7	0.47	10.7	224	20.9

a : O-AR = air resistance measured by original cylinder.

b : M-AR = " " modified cylinder.

Gurley densometer による透気度に換算して 0.1~80sec. の範囲の比較的多孔性の紙の測定に適合しており、その測定値は前述の係数により換算して正確なる透気度として表記することが可能である。

II. 紙の坪量と物理的諸性質との関係について

紙の坪量と物理的性質との関係を考察するために、抄紙時の繊維濃度を变化せしめ、その他は同一条件にて手抄試験紙を作成した。坪量 30g/m² から 400g/m² の範囲において、原料パ

Table 4a. Effect of basis weight on the physical properties of paper.

sample No.	basis weight, g/m ²	thickness mm	density g/cm ³	air resistance, sec.	breaking length, m	elongation %	burst factor	tear factor
A-UBKP 6	31.9	0.121	0.26	0.02	540	0.90	—	69
" 7	57.5	0.225	0.26	0.04	600	1.10	—	71
" 8	120	0.358	0.34	0.13	920	1.38	—	100
" 9	179	0.545	0.33	0.19	890	1.36	—	91
" 10	245	0.765	0.32	0.29	900	1.40	—	76
" 11	402	1.230	0.32	0.48	820	1.88	—	77
BSP (a) 1	31.2	0.051	0.61	0.74	1920	1.12	0.55	97
" 2	67.5	0.113	0.60	2.78	2220	2.84	1.04	111
" 3	136	0.239	0.59	9.13	2530	3.20	1.24	118
" 4	204	0.352	0.58	14.6	2270	3.32	1.41	121
" 5	271	0.445	0.61	19.9	2210	3.64	1.51	121
" 6	379	0.614	0.62	30.8	2110	4.44	—	132
BSP (b) 1	33.8	0.051	0.66	4.78	1830	2.48	0.59	51
" 2	68.7	0.094	0.73	33.1	2700	3.00	1.31	70
" 3	137	0.194	0.71	102	2840	3.58	1.58	87
" 4	208	0.294	0.71	165	2750	3.52	1.67	90
" 5	278	0.399	0.70	202	2420	4.44	1.73	94
" 6	407	0.581	0.70	299	2370	4.64	—	108

Note : S-R freeness { A-UBKP.....900 ml, BSP (a)..... 835 ml
 BSP (b).....595 ml, UBKP 855 ml
 L•KP865 ml, C-L•KP 855 ml

ルブのことなる数種の紙について Table 4a および 4b の如き結果が得られた。使用パルプは前述の AUBKP, BSP, UBKP および Linter と UBKP を 3 : 7 の割合にて混合したパルプ(L・KP), 更にこれを 100 mesh スクリーンにて篩別し微細繊維を除去したパルプ (C-L・KP) の合計 5 種類である。

Taleb 4b. Effect of basis weight on the physical properties of paper.

sample No.	basis weight g/m^2	thickness mm	density g/cm^3	air resistance $sec.$
UBKP 1	67.6	0.138	0.49	1.07
// 2	88.2	0.177	0.50	1.57
// 3	112	0.227	0.49	2.47
// 4	136	0.282	0.48	3.63
// 5	159	0.318	0.50	4.20
// 6	185	0.377	0.49	5.19
// 7	200	0.421	0.51	6.07
L・KP ^a 1	65.6	0.131	0.50	0.93
// 2	88.2	0.183	0.48	1.53
// 3	112	0.228	0.49	2.15
// 4	135	0.274	0.49	2.69
// 5	158	0.321	0.49	3.49
// 6	180	0.376	0.48	4.04
// 7	193	0.390	0.50	4.55
C-L・KP ^b 2	88.8	0.210	0.42	0.89
// 3	109	0.271	0.40	1.29
// 4	140	0.323	0.43	1.72
// 5	158	0.368	0.43	2.07
// 6	187	0.423	0.44	2.52
// 7	209	0.477	0.45	2.91

a : Blended pulp of linter and unbleached kraft pulp.

b : Retained pulp on 100 mesh screen by classification.

(1) 紙の機械的性質はおおむね坪量の変動に対し直線的な増減を示した。かかる関係は以前に破裂強さについて報ぜられているが²⁾, これに対し比引裂強度は坪量の増加に伴ない著しく向上するが, 他の強度はパルプの **freeness** によつて変化するため一定の関係を見出せない

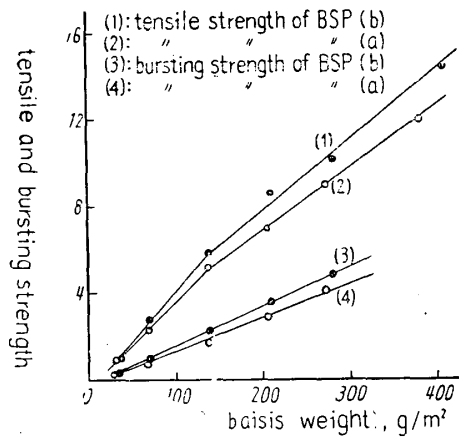


Fig. 2. Relations of the basis weight of paper to the tensile and bursting strengths.

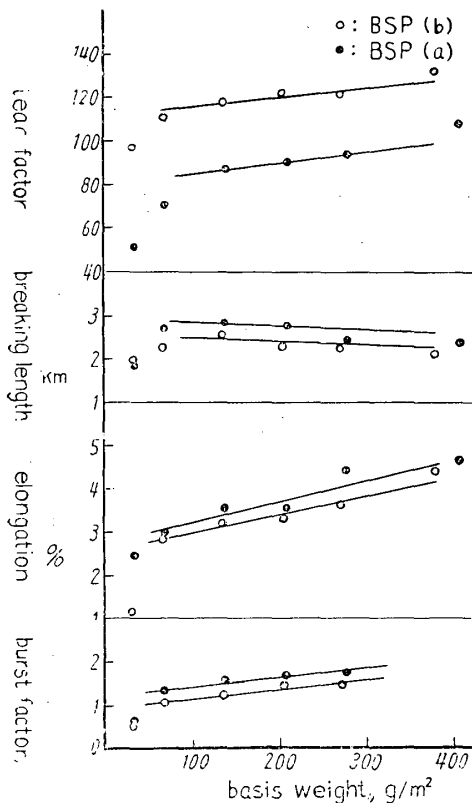


Fig. 3. Relations of the basis weight to the physical properties of paper.

という報告³⁾もある。これを明らかにするため坪量と引張および破裂強さとの関係を Fig. 2 に示した。破裂強さは直線的関係にあるが、引張強さは坪量 100 g/m² 附近を境として直線の勾配が変化している。引裂強度は図示していないが、破裂強さと同じく直線的関係を有している。

各比強度と坪量の関係を示すと Fig. 3 の如くなる。比破裂度、伸度、比引裂度などはいずれも坪量の増加に伴ない少しずつ上昇しているが、裂断長は逆にわずかながら減少を示した。この原因について考えると、紙の坪量の増加は標準手抄試験機における繊維濃度の増大によつてもたらされたものであるから、当然繊維の分散性が不均一となり紙の地合を不良化する。その

ために引張試験における強度の増加が坪量に比例せず、従つて裂断長が減少するものと思われる。比破裂度については地合の不良化による減少を紙の伸度の増加によつて補うために、坪量の増加に対し上昇の傾向を示すものであろう。比引裂度については、このような瞬間的に荷重を与える強度は坪量の増加により特に向上する傾向があるが、そのほかに坪量の増加は当然紙の厚さを増大せしめるゆえ、試験時における紙層の剝離が大きく認められるようになる。このために比引裂度が増加するものと考えられる。Jones⁴⁾も引裂強さについて同様な実験を行い、紙層の剝離部分の面積を測定した結果より同様な見解を報告している。

要するに坪量が小なる場合、比強度を求めることは Fig. 3 より明らかな如く殆ど無意味であり、比強度の算出法より考えても坪量 100g/m² 附近を標準として試験紙を作成すべきではないと思われる。

(2) 紙の物理的性質のうち、紙の密度は坪量の大小に関係なく、原質パルプの種類および叩解状態によつて一定の値を示した (Fig. 4)。しかしながら、坪量の小なる場合は密度のばらつきが著しく、従つてほかの物理的諸性質にも大きな影響を及ぼすものと思われる。

紙の厚さおよび透気度はいずれも坪量の増加に対し、直線的な増加を示した。従つてこの両者の間にも一次的な関係が存在する筈である。Fig. 5 に見る如く、紙の厚さに対する透気度

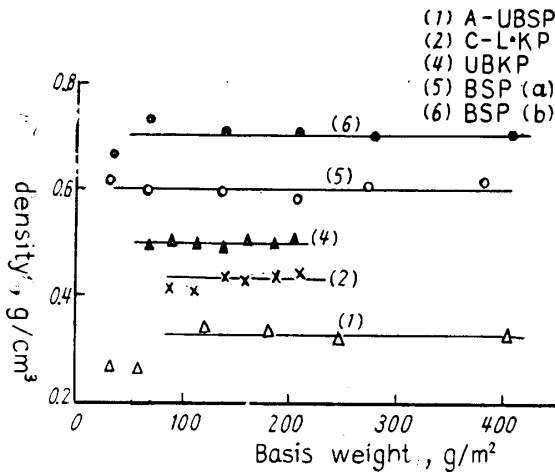


Fig. 4. Relation of the basis weight to the density of paper.

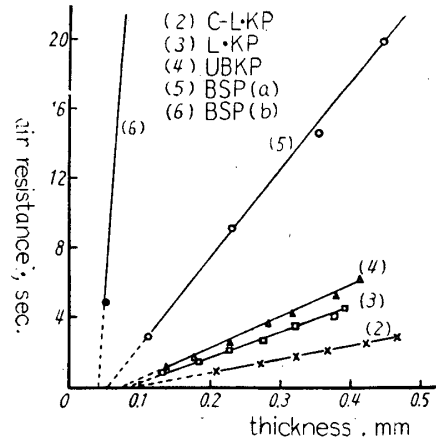


Fig. 5. Relation of air resistance to the thickness of paper.

の関係を検討すると、各直線はいずれも原点を通らないことが明瞭である。すなわち紙の厚さが減少して或る点に達すると紙の透気度は零になる。もちろんこれは作図的に得られるもので実際にこの通り減少して行くとは推定できない。何故ならば紙の厚さが余り薄くなると、針孔 (pin hole) が増加しかつ拡大され、遂に紙としての組織を部分的に欠如するからである。この透気度の直線が原点を通らないことより考へて、以前の報告⁵⁾で述べた如き単純な方法を用いて比透気度 (単位厚さの紙に対する透気度) を算出することは殆ど無意味であることが明瞭となつた。

透気度が零となるべき最小の紙の厚さを仮りに限界厚さと名付けるとしよう。この限界厚さおよび透気度直線の勾配は Fig. 5 に見る如く、原質パルプの種類および状態によつて多種多様に見える。しかし透気度に最も直接的な関係を有する紙の密度を考慮に入れると、密度が大となれば限界厚さが減少し、直線の勾配は増大することが認められる。これらの間の関係を知

Table 5. Relationship between air resistance and thickness of paper.

sample No.	density g/cm ³	line No. in Fig. 5	experimental formula	thickness at AR=0	gradient
BSP (b)	0.710	6	AR=533T-6.40	0.012	533
BSP (a)	0.600	5	AR=53.4T-3.16	0.059	53.4
UBKP	0.494	4	AR=16.7T-1.16	0.069	16.7
L·KP	0.490	3	AR=13.7T-0.962	0.070	13.7
C-L·KP	0.428	2	AR=7.57T-0.693	0.092	7.57
A-UBKP	0.328	—	AR=0.42T-0.039	0.093	0.42

Note : AR=air resistance, T=thickness

るために、紙の厚さ-透気度の実験式を最小 2 乗法により求めた。その結果 Table 5 に示す如き限界厚さと直線勾配とが得られた。前者は紙の密度に対し一次的に、また後者は二次的に変化するように推測されるが、実験の総数が少ないので正確な断定は下せない。要約すれば密度 0.7 の紙で厚さ 0.01mm, 密度 0.3 のもので厚さ 0.1mm において透気度が零となることがわかる。また厚さに対する透気度の増加率はパルプの種類, 状態により著しく変動し、叩解 BSP の 530 から低密度の A-UBKP の 0.4 まで両極端的な値を示した。この限界厚さあるいは勾配のいずれかと密度との関係を実験的に求めることができれば、任意の紙の透気度を簡単な方程式に従って算出することが可能となるであろう。

Ⅲ. 湿紙に対する圧縮力と諸性質との関係について

常法に従って手抄試験紙を作成する過程において、湿紙に対する圧縮力を変化した場合、紙の物理的性質に与える影響について検討した。試料は UBKP を機械的および化学的に処理したものである。Table 6 に示す如く圧力の増加に対し最も大なる変化を示すのは透気度であ

Table 6. Effect of wet pressing on the physical properties of paper.

sample No.	basis weight g/m^2	pressure kg/cm^2	thickness mm	density g/cm^3	air resistance $sec.$	breaking length, m	elongation %	burst factor	Tear factor
UBKP(a) 1	165	1.5	0.311	0.53	9.27	4.59	4.44	4.10	280
" 2	171	4.5	0.284	0.60	17.9	4.73	4.52	4.40	282
" 3	162	7.5	0.263	0.62	21.1	5.18	4.54	4.47	273
" 4	159	10.5	0.240	0.66	25.8	5.17	4.80	4.74	260
UBKP(b) 1	156	1.5	0.220	0.71	661	6.93	4.08	—	227
" 2	161	4.5	0.211	0.76	1020	7.53	4.36	—	242
" 3	166	7.5	0.213	0.78	1368	7.41	4.56	—	237
" 4	156	10.5	0.191	0.82	1813	7.68	4.28	—	236
A-UBKP 12	141	1.5	0.356	0.40	1.07	2.53	4.04	1.83	221
" 13	146	4.5	0.308	0.47	1.65	2.79	4.40	1.88	236
" 14	149	7.5	0.307	0.49	2.29	2.78	4.44	1.93	231
" 15	139	10.5	0.280	0.50	2.69	2.80	4.84	1.98	217

Note : S-R freeness { UBKP (a) 840 ml, A-UBKP 860 ml
 { UBKP (b) 520 ml

り、ついで密度、伸度、強度の順となつてゐる。強度的性質のうち、裂断長、比破裂度は圧力の増加に対し少し上昇するが、比引裂度はパルプの状態によつて影響がことなる。

紙の透気度はパルプの状態によつて全く order のことなる値を示すが、実験範囲内の圧縮

力に対してはいずれも直線的な関係にあり、ほぼ同様な増加率を示した (Fig. 6). 紙の密度については、圧力の増加に対しいずれのパルプも最初急激に増大する傾向を示した。圧縮力と密度増加率との関係については、圧力を取去つてより風乾するまでの繊維の回復能力が大きく影響を及ぼす^{6), 7)}。その観点より Fig. 7 を見ると、叩解された UBKP は密度増加率が最

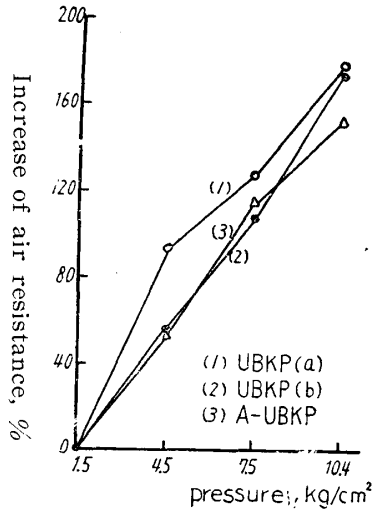


Fig. 6. Relation of the pressure on wet sheet to the increase of air resistance of paper.

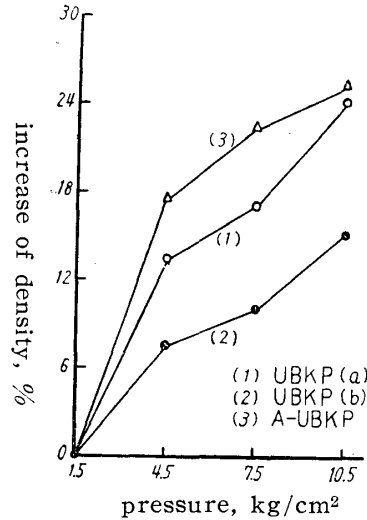


Fig. 7. Relation of the pressure on wet sheet to the increase of density of paper.

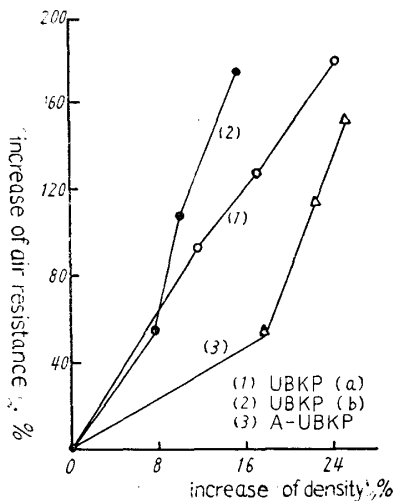


Fig. 8. Relation of the increase of density to the increase of air resistance by the wet pressing.

小で、繊維が膨潤・屈曲し脱ヘミセルローズされた A-UBKP が最高の増加率を示したこと、および圧縮力が大きくなると A-UBKP の密度増加率が UBKP に比し減少することも説明され得る。

この密度および透気度の増加率間の関係を Fig. 8 について検討すると、低密度の A-UBKP はほかのパルプよりも、密度増加の小なる範囲では透気度増加も小なることが特徴である。最も高密度の叩解された UBKP は A-UBKP の場合の約 1/2 の密度増加にて同一の透気度増加率を示した。

要するに紙の密度の増加は実験範囲内の最高圧縮力で 15~25 % であり、紙の強度増加はその 1/2 以下であるが、透気度は 150~180 % と著しい増加を示している。従つて湿紙時の圧縮は紙の強度に対するよりも十数倍の大きな影響を透気度に与えることが明らかとなり、試験紙抄造上最も注意を必要とする過程であろう。なお繊維の叩解による密度の増加の場合における透気度の変化との関連性またはその相違については

あらためて検討したいと考える。

要 約

多孔質な紙の透気度を測定するために densometer の内筒を改造した。改造した内筒は原内筒に比較して、重量は約 1/3、試片に対する空気通過孔の面積は約 1/8 である。この改造内筒を使用して試片に対する空気圧力を変化せしめて透気度を測定した結果、透気度は正確に圧力に逆比例することが認められた。この改造内筒による透気度は通常の内筒による透気度の 23 倍に相当することが理論的、実験的に確認された。従つてこの改造内筒は通常 の Gurley densometer による透気度に換算して 0.1~80sec. の範囲の比較的多孔性の紙の測定に適當である。

紙の坪量と物理的性質との関係を検討するために、標準手抄試験機を使用し、抄造時の繊維濃度を増加して試験紙を作成した。紙の機械的性質はおおむね坪量の増加に対し直線的な関係を示した。しかしながら各比強度については比破裂度、伸度、比引裂度はいずれも坪量の増加に対して少しづつ上昇しているが、裂断長はわずかながら減少の傾向を示した。坪量が約 100g/m² より小なる場合は、それぞれの比強度の平均値に対する差が非常に大きいことが認められた。

紙の密度は坪量の大小に関係なく、パルプの種類によつて一定の値を示した。紙の厚さおよび透気度は坪量の増加に対し直線的な増加を示した。従つてこの両者の間にも一次的な関係が存在することはあきらかであり、また厚さに対する透気度の増加率および透気度が零となるべき最小の紙の厚さは、密度と非常に密接な関係を有することが認められた。

常法に従つて手抄試験紙を作成する過程において、湿紙に対する圧縮力を変化せしめ、紙の物理的性質に与える影響について検討した。実験範囲内の圧縮力において、紙の密度の増加は最高圧縮力で 15~25 % であり、紙の強度増加はその 1/2 以下であるのに対し、透気度は 150~180 % と著しく増大した。従つて湿紙の圧縮は試験紙葉作成の工程上、最も注意を要するものの一つである。

Résumé

The air resistance of porous paper was measured with a modified densometer which was consisted of light inner cylinder having a small pore for air transit. The comparison between the two inner cylinders is shown in Table 1. Using this modified cylinder, the time for flow of 100 ml. air was inversely proportional to the air pressure (Figure 1) and corresponded to 23 times as large air resistance value as was measured by the original cylinder. Therefore, the modified cylinder is suitable to determine the low air resistance from 0.1 to 80 sec.

The handmade test sheets having various basis weight were prepared by the method of increasing the fiber consistency at the standard test sheet machine. The increase of basis weight affected proportionally on the sheet strength. In respect to the mechanical properties, the burst factor, elongation and tear factor, increased slightly, but no increase was brought about on the breaking length.

It was more important fact that the deviations from the average strength factors were remarkably great at basis weight smaller than 100 g/m^2 as shown in Figure 3. The density of paper was only the physical property which was not affected by the basis weight (Figure 4). It was found that a linear relationship existed between the thickness of paper and the air resistance. Then the increasing rate of air resistance and the minimum thickness of which the air resistance became to zero were also closely related to the density of paper (Figure 5 and Table 5).

In the process of ordinary preparation of test sheet, the wet sheets were pressed under various pressures. When applied such a high pressure as 10.5 kg/cm^2 , the increasing rates of physical properties of paper were roughly 10% in strength, 25% in density and 180% in air resistance. Owing to the excellent ability of recovery from compression, the alkali-treated unbleached kraft pulp reduced gradually the increasing rate of density as the pressure was raised (Figure 7). For that reason, the accurate wet pressing on the test sheet is required particularly for the study of air resistance.

文 献

- 1) 木村良次, 寺谷文之: 木材研究 **17**, 9 (1957)
- 2) The Paper Maker's Association: "Second Report of the Pulp Evaluation Committee" p.90 (1936)
- 3) 上野桂助: "紙の強度" P.167 (1955)
- 4) H. W. H. Jones: Pulp & Paper Mag. Can. **53**, 5 (1952)
- 5) 寺谷文之, 木村良次: 木材研究 **19**, 1 (1958)
- 6) C. O. Seborg, F. A. Simmonds, P. K. Baird: Paper Trade J. **109**, No. 8, 83 (1939)
- 7) W. B. Campbell: Pulp & Paper Mag. Can. **48**, 3, 103 (1947)