研究報告

木材ファイバー充てん層の透過抵抗*

On Pressure Drop of Water through Fiber Bed

遠藤 展**

Hiromu Endoh

高橋 裕**

Hiroshi Takahashi

遠藤 一夫***

Kazuo Endoh

1. まえがき

さきに筆者らは、乾燥ファイバーの充てん層について、層流から乱流域への遷移領域における空気透過抵抗が、Ergunの実験的相関式¹⁾をファイバーの形状係数で補正した形で表しうることを示した²⁾。実用的には、乾式ファイバーボードの製造工程においてファイバーマットを、所定の空間率に抄き上げる場合、その工程管理の手段として、空気透過抵抗が有効であるとの知見を示したことになる。一方、紙、湿式ファイバーボードなど水を媒体として抄造する製造工程では、古くからフリーネス（原理的にはパルプ層の水抵抗）の測定が、パルプの品質の評価あるいは製造工程の管理に常用されている。しかし、フリーネスの内容そのものはまだ十分に明らかにされているわけではなく、フリーネスの値はいくつかの因子によって支配されるため、この値のみでは個々の特性要因の変動を検出できず、必ずしも普遍的な管理手段となりえないとの指摘も多い³⁾。したがって、フリーネスがパルプ層の透水抵抗とある種の関係にあるとすれば、この透水抵抗に関する諸因子間の相関関係を明らかにすることによって、よりフリーネスを実用的な指標となしうることになる。このためパルプ層の透水抵抗の検討を目的としたが、流体として空気を用いるか水を用いるかのちがいは、物理的には本質的な差異があるとは考えられない。したがって、本研究では、さきの乾燥ファイバーによってえられた相関関係を、透水抵抗によって再検討するとともに、層流域を含めて実験範囲を拡大し、ファイバーの形状係数と透水圧損失との関係をもとめている。

2. 実験装置および実験方法

実験装置を Fig. 1 に示した。充てん層本体は内径48

mmのアクリルパイプ製で、パイプ下端に16メッシュの金網を固定した。金網のみの透水圧損失は、試料を加えた場合の圧損失に比べて十分小さいことを確認している。水は充てん層上部のオーバーフローをもつヘッドタンクより自然に流下させて、その流量はオリフィスで測定している。また流量の調節は出口バルブによっておこなった。充てん層の圧力損失は、層上部と下部に圧力測定端をとりつけ、マノメータによって測定した。

実験に用いた試料は代表的工業材4種であり、Table 1にファイバー粒度、形状係数などを示した。一般に木材は樹の種類によって、その物理的、化学的組成が異なり、木材を摩砕してえられたファイバーについても、樹種による特徴が現れるといわれている。ここでは、みかけ密度を基準として上記4種の樹種をえらんでいる。これらの原料を通常の摩砕条件、すなわち水蒸気蒸煮後、ダブル・ディスク・リファイナーで水を添加しながら湿式解繊によってパルプ化をおこなった。

ファイバー相互のからみ合いによって、様な空間率の状態にパルプを充てんすることはむづかしいので、所

Fig. 1 実験装置の構成

昭和49年7月8日

* 化学工学協会第39年会 (1974. 4. 2 神戸)

** 北海道立林産試験場 (〒070 旭川市緑町12) TEL 0166-51-1171

*** 北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北12条西8) TEL 011-711-2111

Table 1 供試ファイバー

樹 種	み かけ 密度 [g/cc]	ファイバー 粒度 d_c [cm]	ファイバー 形状係数 ϕ_f
シナノキ	0.33	$6.1 \sim 18.6 \times 10^{-2}$	1.3~7.3
ラ ウ ン	0.46	$2.4 \sim 9.2 \times 10^{-2}$	2.4~7.3
ブナノキ	0.49	2.5×10^{-2}	4.4
ミズナラ	0.62	5.8×10^{-2}	1.1

定量の含水パルプに水を加え、低速回転のミキサーでからみ合いを解除し、水中にファイバーを分散させた。充てん層底部の金網から10mmの高さまで水を入れておき、その中にスラリー状の試料を流し込んで水中における分級を阻止し空間率を一樣としている。

パルプ充てん層の空間率 ϵ を変えるために、多孔板によって、充てん層上部より空間率が一樣になるようにゆっくり圧縮した。このさい、仕込量の異なる試料について、同一空間率になるように圧縮した場合、層高 L_b [cm]と圧損失 ΔP [G/cm²]とが比例関係にあることが実験的に認められ、空間率は層高方向に一樣と仮定できることを確かめている。

3. 実験結果とその考察

パルプ充てん層の層高を L_b [cm]とし、空筒速度 u_f [cm/sec]で水を流した場合、その圧損失を ΔP [G/cm²]とする。充てん層単位層高当りの圧損失 $\Delta P/L_b$ [G/cm³]と空筒速度 u_f との関係の一例をFig. 2に示した。同図中 d_c [cm]は篩目開き基準50%粒径に対応するファイバーの投影断面積 f [cm²]から算出した円相当径 $(=\sqrt{4f/\pi})$ である。 $\Delta P/L_b$ と u_f とは比例関係が認められ、本実験範囲は層流領域であるといえる。同一空筒速度 u_f では形状係数 ϕ_f が大きくなるほど、圧損失 $\Delta P/L_b$ は大きくなる傾向にある。ここでいう形状係数 ϕ_f は、さきに筆者らが定義した a'/a である⁴⁾。すなわち、ファイバーはFig. 3に示すごとく、きわめて複雑で特異な形をしているが、このファイバーを骨格と派生する細毛とより成ると考えた場合、骨格部が支配する面積 $a(=l \times b$ [cm²])と、骨格部を含めた派生する細毛の支配する最大面積 $a'(=l' \times b'$ [cm²])との比を ϕ_f としている。この ϕ_f はファイバー充てん層の空気透過抵抗⁴⁾、圧縮性⁵⁾および強度的性質^{5,6)}などを規定するパラメータである。

Fig. 2で認められる傾向は、さきに報告した空気透過抵抗に関する傾向と同様であるが、空気透過抵抗のデータから推算される圧損失 $\Delta P/L_b$ よりも大きな値をとっている。本実験のファイバーは十分含水膨潤しているため、その容積はさきの実験に供試した乾燥ファイバーに

Fig. 2 圧損失 $\Delta P/L_b$ と空筒速度 U_f との関係

Fig. 3 ファイバーの形状と代表長さ

比して大きくなり、したがって空間率は乾燥状態における空間率に比べて小さくなるであろうことが考えられる。このため、含水膨潤状態のファイバーのみかけ密度を測定する必要があるが、これに関する知見は全くない。本実験では次のごとき測定法によって、みかけ密度を定義した。

スラリー状パルプの重量 W_0 [G]と、その体積 V_0 [cc]をあらかじめ測定し、供試パルプの乾燥曲線、および乾燥速度曲線の挙動からファイバーのみの湿潤重量 W_{fw} を推定した。比較的空間率の大きい試料について、恒温乾燥器の温度を105℃一定とし、えられたパルプの乾燥曲線ならびに乾燥速度曲線をFig. 4, 5に示した。図示のごとく、予熱期間、恒率乾燥期間、減率乾燥期間が明確に認められ、減率乾燥期間への移行点、すなわち限界含水率をもって、湿潤重量 W_{fw} [G]とした。これらの結果から湿潤容積 V_{fw} [cc]を次式によってもとめた。

$$V_{fw} = V_0 - (W_0 - W_{fw}) / \rho_w$$

ただし、 ρ_w は水の比重量 [G/cm³]である。さらに供

Fig. 4 パルプの乾燥曲線

Fig. 5 パルプの乾燥速度曲線

試ファイバーの乾燥重量を W_{fd} [G] とすると, $V_{fw}/W_{fd} = \alpha$ は乾燥ファイバー 1 G が占める湿潤容積となる。したがって $1/\alpha$ が, 本実験で定義するファイバーのみかけ密度を表すことになる。このようにして求めたファイバーのみかけ密度を用いて, パルプ充てん層の空間率を算出し, 空間率関数 $\varepsilon^3/(1-\varepsilon)^2$ と, 空筒速度 $u_f = 1 \text{ cm/sec}$ における圧損失 $\Delta P/L_b$ [G/cm³] との関係を Fig. 6 に示した。

Fig. 6 においても $\Delta P/L_b$ と $\varepsilon^3/(1-\varepsilon)^2$ との間には, 形状係数 ϕ_f をパラメータとして反比例の関係が認められ, 通常層流領域に適用される Kozeny-Carman の式によって, 本実験のパルプ層の流体抵抗の表示が可能となると考えられる。

抵抗係数 f_k と $R_e/1-\varepsilon$ との関係を Fig. 7 に示した。この結果, 形状係数 ϕ_f をパラメータとして, 同図中点線で示した球形粒子に関する Kozeny-Carman の式の相関ときわめて類似した関係が現れている。 $R_e/1-\varepsilon$ の値が 100 以上のデータは, さきに筆者らのおこなった遷移域の結果を同図上にプロットしたものである。このように水中下におけるパルプ層の空間率 ε を, 上のべたご

Fig. 6 圧損失 $\Delta P/L_b$ と空間率関数 $\varepsilon^3/(1-\varepsilon)^2$ との関係

Fig. 7 抵抗係数 f_k とレイノルズ数 $R_e/1-\varepsilon$ との関係

とく定義すれば, $R_e/1-\varepsilon$ と ϕ_f とが同等の場合には, 水, 空気ともに同等の抵抗係数を示すことが知られ, 同一の ϕ_f に関して層流領域から中間遷移領域まで同一の相関をもって表示しうることが分る。

木材ファイバーのように複雑形状粉粒体層中を, 流体が透過するさいの抵抗を支配する因子に形状係数 ϕ_f が大きく関与し, その関与は本実験の層流領域およびさきの遷移領域を含めて, ほぼ 2.4 乗であることが見出される。したがって, 流体抵抗に関しては層流から乱流まで含めて, 球形近似可能な通常の粉・粒体に関する圧損失の表示式の係数は, ファイバーに関してその形状係数 ϕ_f の関数として表しうることの可能性が示されたことになる。

4. むすび

製紙用パルプ，あるいは湿式ファイバーボード用パルプにおけるパルプの品質ならびに抄造速度などは，水の透過速度を代表的な指標として推定されている。しかし，ファイバーに関しては透過抵抗のもつ物理的内容を明らかにした研究はほとんど見出せない。本研究はさきに筆者らが検討した乾燥ファイバー充てん層の遷移域における空気透過抵抗に関する知見が，水を媒体とした場合の層流域に関しても，同種の扱いが可能であるかについて検討をおこなった。この結果，さきの空気透過抵抗同様，ファイバーの形状係数 ϕ_f をパラメータとして抵

抗係数が律せられることが分り，形状係数 ϕ_f の関与は遷移域における関与とはほぼ同等であることが確かめられた。したがって，木材ファイバーのように形状が複雑で，通常の球形近似可能な粉粒体とは同一視できぬと考えられているものについても，形状係数 ϕ_f をパラメータとする限りでは，層流領域から乱流領域までも含めて，粉粒体同様の取り扱いが可能であることが示された。これらの知見からファイバー層の透過抵抗を予測しうることになり，本研究は実用の工程管理の基礎資料となりうることになる。

記 号

a	: ファイバー骨格部のみの面積 ($l \times b$)	[cm ²]	u_f	: 空筒速度	[cm/sec]
a'	: 派生する細毛部を含むファイバーの支配面積 ($l' \times b'$)	[cm ²]	V_0	: スラリーパルプの体積	[cc]
b	: ファイバー骨格部の短径	[cm]	V_{fw}	: ファイバーの湿潤体積	[cc]
b'	: ファイバー細毛部を含めた短径	[cm]	W_0	: スラリーパルプの重量	[G]
d_c	: ファイバーの円相当径 ($\sqrt{4f/\pi}$)	[cm]	W_{fd}	: 乾燥ファイバーの重量	[G]
f	: ファイバー1本の投影断面積	[cm ²]	W_{fw}	: ファイバーの湿潤重量	[G]
L_b	: 充てん層の層高	[cm]	α	: ファイバー1Gが占める湿潤容積 (V_{fw}/W_{fd})	[cm ³ /G]
l	: ファイバー骨格部の長径	[cm]	ε	: 空間率	[—]
l'	: ファイバー細毛部を含めた長径	[cm]	ϕ_f	: ファイバーの形状係数 (a'/a)	[—]
Δp	: 圧損失	[G/cm ²]	ρ_w	: 水の比重量	[G/cm ³]
Re	: レイノルズ数 ($d_c \rho u_f / \mu$)	[—]			

引 用 文 献

- 1) Ergun, S.: *Chem. Eng. Progress*, **48**, 89 (1952)
- 2) Cowan, W. F.: *Pulp Paper Mag. Can.*, **71**, T-201 (1970)
- 3) Marton, R., Robie, J. D.: *Tappi*, **52**, 2400 (1969)
- 4) 高橋裕，遠藤一夫，鈴木弘：粉体工学研究会誌，**8**, 258 (1971)
- 5) 高橋裕，遠藤展，大沢清志，遠藤一夫：粉体工学研究会誌，**9**, 161 (1972)
- 6) 高橋裕，遠藤展，遠藤一夫：粉体工学研究会誌，**10**, 23 (1973)

Author's Abstract

On Pressure Drop of Water through Fiber Bed

by

Hiromu ENDOH* Hiroshi TAKAHASHI* Kazuo ENDOH**

(* Hokkaido Forest Products Research Institute)
(** Faculty of Engineering, Hokkaido University)

In the previous paper, pressure drop of air through fiber bed was investigated in the transition region from laminar to turbulent flow.

To obtain the data for laminar flow, this paper deals with the experiment on pressure drop of water through the bed and the experimental correlation of pressure drop from laminar to turbulent flow was obtained.

The correlation thus obtained was similar to the relation for usual particulate solid bed with the experimental constant related to ϕ_f , the shape factor of fiber we defined.

List of Figures and Table

Table 1 Experimental fibers

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Relation between pressure drop $\Delta p/L_b$ and superficial water velocity u_f

Fig. 3 Definition of fiber length (l , l') and

thickness (b , b')

Fig. 4 Drying curve of pulp bed

Fig. 5 Drying rate curve of pulp bed

Fig. 6 Relation between pressure drop $\Delta p/L_b$ and $\varepsilon^3/(1-\varepsilon)^2$

Fig. 7 Correlation between f_k and $Re/1-\varepsilon$