研究報告

木材ファイバー充てん層の空気透過抵抗について

Pressure Drop of the Air through Packed Wood Fiber Bed

高橋 裕* 遠藤 一夫**
Hiroshi Takahashi Kazuo Endoh

鈴木 弘*
Hiroshi Suzuki

1. ま え が き

紙、湿式ファイバーボードなどの製造工程においてはファイバー品質の評価、製造工程の管理などにろ水抵抗¹⁾（フリーネス）の測定が常用されている。このろ水抵抗はファイバーの比表面積との相関が大きい²⁾ため、現在管理指標上の重要な特性値とされている^{1,2)}。したがって、湿式操作においては、ろ水抵抗に関するファイバーの形状³⁾などの研究が行われてきた。

しかしながら、乾式解繊によるファイバーの特性値として、その空気透過抵抗を用いようとする試みについては、未だ報告がない。たとえば、乾式ファイバーボードの製造工程において、通気法によるファイバーマットの形成など、工程に直接関与するにもかかわらず、ファイバー粒度と所定の空間率に、抄き上げるために要する空気抵抗との関係は、全く検討が加えられていない。

本報告は、この種の実用的課題を実験的に検討することを目的とし、空間率と粒度、さらにはファイバー形状の影響を含めて、著しく形状が球と異なる細毛を派生する繊維状のファイバーについて、空気透過抵抗がどのような相関関係によって表わしうるかを示した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置を図1に示した。本体は硬質塩化ビニール製の透明パイプで、その内径は98.0mmである。パイプ下端に、実験試料よりも細かい目のフルイ用の金網を固定した。金網のみの圧損失は、試料を加えた場合の圧損失に比して十分に小さい。固定金網の下部壁面に圧力測定端をとりつけ、圧損失を水柱マンメーターによって測定した。ブロアーによって下部より吸引し、本体とブロー

ーの間に乾式ガスメーターを接続して、風量を測定している。

実験に用いた試料は、代表的工業材であるシナノキ、ミズナラ、ラワンのファイバーであり、それぞれダブル・ディスク・リファイナー⁴⁾によって製造し、JIS標準フルイによって、各フラクションごとに粒度を整えている。

ファイバーの充てんは、本体パイプの上部に、円錐形のファイバー投入口をもうけ、その上部から試料に規定量の散弾を凝固防止のために加えたフルイのフルイ目を通して、ファイバー投入口に落下した。

ファイバー充てん層の空間率を変えるために、底部に金網をはったピストンによって圧縮し、そのピストンを固定した。

図1 実験装置

昭和46年2月16日受理

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

** 北海道大学工学部合成化学工学科 (〒060 札幌市北12条西8)
TEL 011-711-2111

3. 実験結果とその考察

3.1 空間率と圧損失の関係

一般にファイバーの自然充てん時の空間率は、非常に大きく、形状が著しく特異なため、変形抵抗の著しく大きい通常の粉粒体とはきわめて挙動を異にしている。

ファイバー充てん層の層高を L [cm] とし、空筒速度 u_f [cm/sec] で吸引した際に、現われる差圧を圧損失 ΔP [G/cm²] とする。本実験では、 ΔP は大気圧を基準とした減圧値となる。

試料上部からピストンによって圧縮し、所定の空間率 ε の状態をつくりだしたが、充てん層の層高の方向に空間率の分布が一樣となることをたしかめるため、仕込量の異なるそれぞれの試料について、同一の空間率になるよう圧縮し、層高 L と圧損失 ΔP との関係を検討した。実験結果の一例が図2であり、 ΔP と L とは比例している。したがって、ピストンを用いて上部より圧縮して

図2 層高と圧損失の関係

図3 圧損失 $\Delta P/L$ と空筒速度との関係

も、空間率は層高方向に一定となることが認められた。

充てん層単位層高当りの圧損失 $\Delta P/L$ と空筒速度 u_f との関係の一例として、シナノキのファイバー、粒度16~32メッシュ・フラクションについて示したのが図3である。この結果、空間率 ε をパラメーターとして、両者の関係は $\Delta P/L \propto u_f^{1.35}$ の相関が認められる。この傾向は本実験の空筒速度の範囲内では、他の実験試料についても同様であった。したがって、本実験の範囲は層流領域外でおこなわれていることになる。図3より、同一空筒速度 $u_f (=28 \text{ cm/sec})$ について $\Delta P/L$ を求め、粒度をパラメーターにして充てん率 $(1-\varepsilon)$ との相関を示したのが図4である。

この結果、同一充てん率においては、ファイバーの粒度が大きくなるほど、 $\Delta P/L$ は小さくなる傾向にあり、他の実験試料についても同様の傾向が認められている。

3.2 粒度と圧損失の相関

ファイバーの粒度の特性値として、1個当りの表面積

図4 $\Delta P/L$ と充てん率との相関

図5 $\Delta P/L$ と投影断面積との相関

に比例すると考えられるスキャンニングによる投影断面積 $f[\text{cm}^2]$ ⁵⁾ を求め、同一空筒速度 $u_f(=28\text{cm/sec})$ 、同一充てん率 $(1-\varepsilon)(=0.1)$ における $\Delta P/L$ との相関を図5に示した。

この結果、圧損失 $\Delta P/L$ は投影断面積によって規定されるが、個体間に差異が認められ、同一投影断面積について $\Delta P/L$ の値は同じにならない。すなわち、空気透過抵抗に關する粒子の大きさを代表するものとしては、投影断面積のみを以てしては適當ではないということになる。

ファイバーは、その形状を代表する骨格部と派生する細毛とより成っている⁵⁾。したがって、ファイバーの通気抵抗は、これら細毛の大小、およびその派生密度によって支配されると考えられる。この骨格部を代表する長径 $l[\text{cm}]$ と短径 $b[\text{cm}]$ を測定し、 $l \times b = a[\text{cm}^2]$ とすると、 a は骨格部のみが占める投影断面積を表わし、細毛を含めた投影断面積 f との間に、きわめて良好な相関関係を認めている⁵⁾。さらに細毛部を含む長径 $l'[\text{cm}]$ と短径 $b'[\text{cm}]$ を測定し、 $l' \times b' = a'[\text{cm}^2]$ とすると、 $(a' - a)$ は、細毛が支配する面積を表わすことになる。 a' と投影断面積との相関を図6に示した。このように a' も投

影断面積 f との間に相関が見出され、この両者の関係は粒度によらず、それぞれの個体について、ほぼ一定に保たれる傾向にある。

a'/a は細毛が支配するファイバーの全面積と、骨格部の面積との比で、この比が大きければ、細毛の占める領域が大きいかを意味し、圧損失に關する有効比表面積は、この比の大きさの影響を受けると考えることができよう。本実験試料について求めた a'/a を表1に示す。本試料については、 a'/a は粒度によらずほぼ一定の値を示したが、備考欄に示したように、同一樹種でも蒸煮条件によって影響をうけるようである。図5から同一投影断面積について、実験試料の $\Delta P/L$ を求め、 a'/a との相関を示したのが、図7である。この結果、圧損失 $\Delta P/L$ と a'/a との間には一義的な相関関係が認められ、 $\Delta P/L$ はファイバーの形状、とくに a'/a で表わした細毛の占有面積比によって、律せられると考えられる。

3.3 木材ファイバー層の圧損失に対する Ergun の式の適用性

本実験は層流からはずれた領域を対象とし、しかも空筒率が0.9に及んでいるので、通常用いられる Kozeny-Carman の式の適用外にある。したがって、乱流域を含む Ergun⁶⁾ の式を適用することを試みた。

Ergun の式は、つぎに示すように流体の全摩擦抵抗が粘性流域と乱流域、それぞれの抵抗の和で表わされるものとしている。

$$\frac{\Delta P \cdot g_c}{L} = k_1 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_f}{D_p^2} + k_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho u_f^2}{D_p} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 D_p : 粒径

μ : 流体の粘性係数

ρ : 流体の密度

運動のエネルギー項と圧損失の比を f_k とすれば、(1)式より

$$f_k = \frac{\Delta P \cdot g_c}{L} \frac{D_p}{\rho u_f^2} \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = k_1 \frac{1-\varepsilon}{R_e} + k_2 \quad \dots\dots(2)$$

図6 供試ファイバーの a' と f との関係

図7 $\Delta P/L$ と a'/a との相関

表1 供試ファイバーの a'/a

樹 種	粒度 (メッシュ) ごとの a'/a				備 考
	9~16	16~32	32~60	60~115	
シナノキ	5.4	—	—	—	原料チップの蒸煮処理せず
シナノキ	—	6.9	7.6	7.4	原料チップの蒸煮6kg/cm²にて5分間
ミズナラ	4.5	3.7	4.7	4.8	原料チップの蒸煮6kg/cm²にて5分間
ラワン	—	2.3	2.5	—	原料チップの蒸煮処理せず
ラワン	4.8	4.2	3.8	—	原料チップの蒸煮5kg/cm²にて5分間

ただし, Re : レイノルズ数 ($D_p \rho u_f / \mu$)

Ergun は実験的に $k_1=150$, $k_2=1.75$ と定め,

$$f_k = 150 \frac{1-\varepsilon}{Re} + 1.75 \quad \dots\dots(3)$$

を与えている。

ファイバーを対象とした本実験について, (2)式による f_k と $Re/(1-\varepsilon)$ との相関を示したのが, 図8である。ここで粒径 $D_p[\text{cm}]$ は, 投影断面積 f 基準の円相当径

図8 f_k と $Re/(1-\varepsilon)$ との相関

図9 a'/a と f_k との相関

($\sqrt{\frac{\pi}{4} f [\text{cm}]}$)を用いた⁵⁾。この結果, ファイバー群につ

いても, 粒径, 空間率などの影響をうけず, f_k と $Re/(1-\varepsilon)$ との間に相関を見出せるが, Ergun の示した実験的相関(3)式と一致はしない。しかし関数形はきわめて類似している。さらに前記 a'/a の大きさと f_k とは関係があり, a'/a が大きくなれば f_k も大きくなっている。図8より $Re/(1-\varepsilon)$ が一定のときの, f_k と a'/a の相関を示したのが図9である。 $a'/a=1.0$ は比表面積によって求められた球相当径に対応し, 本実験の対象とするファイバーでは骨格部のみの状態を示すことになる。図示のごとく, 本実験の相関関係を $a'/a=1.0$ に外挿した点における f_k は, 比表面積によって求められた相当径基準に関する Ergun の式とよく一致している。このようにファイバー群についても, 形状に関する因子を a'/a の関数とすることによって, Ergun の式の適用が可能となる。変形抵抗の大きい通常の粉粒体とは, 異質のごとき木材ファイバーについても, このような扱いによって, 通常の粉粒体同様に圧損失の推定ができることになる。

図8, 図9より, 木材ファイバー充てん層の空気透過抵抗に関する実験式として, 次式がえられる。

$$f_k = K^* \left[150 \frac{1-\varepsilon}{Re} + 1.75 \right] \quad \dots\dots(4)$$

$$\frac{\Delta P \cdot g_c}{L} = K^* \left[150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_f}{D_p^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho u_f^2}{D_p} \right] \quad \dots\dots(5)$$

ただし, $K^*=(a'/a)^{2.4}$

木材ファイバーを対象としてえられた, 本実験の実験的相関(4)式と実測値との比較を試みたのが, 図10である。

図10 実測値と実験式との比較

4. む す び

木材ファイバー群の充てん層について、充てん層高さ、空間率、空筒速度をかえ空気透過抵抗を測定し、つぎの知見をえた。

ファイバー群の空気透過抵抗は、代表粒径としてスキヤニングによる投影断面積基準の円相当径を用い、細毛の派生構造を示す形状の係数として、細毛支配面積 a' と、ファイバー骨格部のみの面積 a との比 a'/a を用いることにより、Ergun の式と同型の関数形で表わすことができ、Ergun の式を細毛部を含むファイバーについて拡張した次式で示される。

$$f_k = K^* \left[150 \frac{1-\varepsilon}{R_e} + 1.75 \right]$$

$$\frac{\Delta P \cdot g_c}{L} = K^* \left[150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_f}{D_p^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho u_f^2}{D_p} \right]$$

$$\text{ただし, } K^* = (a'/a)^{2.4}$$

上述の知見によって、木材ファイバー群の粒度表示を、通気抵抗の測定によって行なうことが可能となり、工程管理に関する既往の困難さの一端が除かれたことになる。

記 号

a : ファイバー骨格部のみの面積 ($l \times b$)	[cm ²]
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]
b : ファイバー骨格部の短径	[cm]
b' : ファイバー細毛部を含めた短径	[cm]
D_p : 粒径	[cm]
f : ファイバー 1 本当りのスキヤニングによる投影断面積	[cm ²]
f_k : 運動のエネルギーと圧損失の比	
K^* : ファイバーの形状に関する係数 $[=(a'/a)^{2.4}]$	

k_1, k_2 : Ergun の式の常数	
L : 充てん層の層高	[cm]
l : ファイバー骨格部の長径	[cm]
l' : ファイバー細毛部を含めた長径	[cm]
ΔP : 圧損失	[G/cm ²]
Re : レイノルズ数 ($D_p \rho u_f / \mu$)	
u_f : 空筒速度	[cm/sec]
ε : 空間率	
ρ : 流体の密度	[g/cm ³]
μ : 流体の粘性係数	[G/cm sec]

引 用 文 献

- 1) 鈴木, 高橋, 遠藤: 粉体工学研究会誌, 7, 292 (1970)
- 2) Forgacs, O. L.: *Pulp Paper Mag. Can.*, 64, T-89 (convention issue 1963)
- 3) Labrecque, R. P.: *Tappi*, 51, 8 (1968)
- 4) 鈴木, 高橋, 遠藤: 粉体工学研究会誌, 7, 279 (1970)
- 5) 鈴木, 高橋, 平野, 遠藤: 粉体工学研究会誌, 6, 239 (1969)
- 6) Ergun, S.: *Chem. Eng. Progress*, 48, 89 (1952)

Summary

Pressure Drop of the Air through Packed Wood Fiber Bed

Hiroshi Takahashi* Kazuo Endoh** Hiroshi Suzuki*

Experiments were performed on pressure drop of the air through packed wood fiber bed. Apparatus used was Cylindrical vessel sized 98mm in diameter. Experimental woods, Oak, Basswood and Lauan, were defibrated by Bauer type Double Disk Refiner.

With the value a'/a , the ratio of projected area of fiber occupied with derivative fibril a' to projected area of fiber body a , the effect of shape of fiber on pressure drop was correlated.

Experimental relation was formulated as follows.

$$f_k = K^* \left[150 \frac{1-\varepsilon}{R_e} + 1.75 \right]$$

$$K^* = (a'/a)^{2.4}$$

f_k : friction factor

R_e : Reynolds number

ε : porosity

(* Hokkaido Forest Products Research Institute
** Hokkaido University)