

Kinematics Analysis for Liquid Diffusion in Disposable Diapers Using Colored Salt Water

YANG Xiaoqi, YANG Minzhuang, MATSUDAIRA Mitsuo

* Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192 Japan

Received 8 March 2004; accepted for publication 9 August 2004

Abstract

Kinematics study of liquid diffusion was carried out for disposable diapers using colored salt water. A three-layers model was proposed for disposable diapers, which consists of diffusion, absorption and waterproof layers. It was clarified that liquid diffusion was proceeded horizontally in the diffusion layer at first, and then vertically into the absorbed layer. The equation of diffusion rate of liquid in the horizontal direction was derived on the basis of the disk model of capillary tubes, which were arranged in radial direction. Diffusion rate of liquid in the vertical direction could be calculated from the velocity curves of diffused liquid. The significance of four characteristic parameters, diffusion rate of liquid in the horizontal direction F_w , diffusion rate of liquid in the vertical direction F_h , the maximum area ratio S_m and the remaining area ratio S_r , proposed in our earlier papers were proved to be valuable.

Key Words: Disposable diapers, Kinematics analysis, Capillary tube, Porous material, Speed equation

有色塩水による紙おむつ内の液体拡散の動力学解析

楊曉旗, 楊敏壯, 松平光男

1. 緒言

吸水性衛生材料における液体拡散のメカニズムに関する検討は、基礎現象として必要であり、また製品の实用性能の改良のためにも重要である。関連する研究は古くから認められるが、その中の大部分の方法は静的状態に限るもので [1]、未だ充分には吸水性衛生材料における液体拡散の性能を評価することはできない。特に、液体を注いだ直後の過渡的状态に関しては、殆ど研究されていない。紙おむつを例にとれば、それは不織布、粉碎パルプ、ポリマーなどから構成され、単一な毛管浸透モデルではその液体拡散のメカニズムを解明することはできない。液体拡散のメカニズムを究明するには、液体拡散の動力学を検討する必要がある。そこで、本研究では液体拡散の動的な評価を試みる。第一報 [2] では動画処理システムを用いて、吸水性衛生材料の液体拡散、吸収特性を計測する方法を確立した。紙おむつにおける水分拡散に関する 3 種類の特徴曲線が表現可能であり、4 つの特

性値（水平方向拡散率 F_w 、垂直方向拡散率 F_h 、最大面積率の平均値 $\overline{S_m}$ と残留面積率の平均値 $\overline{S_r}$ ）を新たに定義できた [2]。これらの特性値により、吸水性衛生材料に関する液体吸収性能の差異を総合的に客観評価することができる。第二報 [3] では有色塩水による紙おむつにおける水分拡散特性を検討し、紙おむつの液体拡散の規則性を調べ、最も適切な計測条件を確立した。実験によると、測定データの再現性がよく、かなり信頼性があることが明らかになった。更に、以上の研究結果以外に、3 種類の特徴曲線で紙おむつにおける水分拡散の動力学を分析できる可能性もあることを示した。特に、小注水量では液体の初期拡散の特徴曲線を調べることで、液体拡散に関するより豊富な情報が入手でき、液体拡散の機構を究明することができる。本報ではこの点に注目して、液体拡散に関するより詳細な動力学解析を行う。

Table 1 Outline of representative disposable diapers

Sample	A	B	C	D	E
Top sheet	Nonwoven (Cotton-Air-Through) PE/PP : C=97 : 3	Nonwoven (Air-Through) PE/PET	Nonwoven (Point-Bond) PP : PE/PP : C=72 : 25 : 3	Nonwoven (Cotton-Air-Through) PE/PP : C=97 : 3	Nonwoven (Spun Bond) PP
Second sheet	Nonwoven (Air-Through)	Nonwoven (Air-Through)	Nonwoven (Air-Through)	Nonwoven (Air-Through)	— —
Polymer	Fit-Cut (10.8g)	Fit-Cut (12.4g)	Fit-Cut (9.5g)	Fit-Cut (11.0g)	Straights (8.4g)
Water proof sheet	PE film	PE film	PE film	PE film	PE film
Weight of sample	(10.6g)	(11.0g)	(10.4g)	(10.7g)	(9.7g)
Thickness of sample	(4.4mm)	(4.7mm)	(4.1mm)	(4.5mm)	(3.9mm)

2. 実験

2.1 試料

実験に用いたサンプルは、表1に示すように、市販されている代表的な5銘柄の紙おむつの股間中央部の $12 \times 12 \text{ cm}^2$ の部分である。周辺切り口はセロハンテープで液体が漏れないように固定する。

2.2 実験方法

実験装置と実験方法は前報のようにカトーテック（株）動画像処理システム（LDES）を用いる[3]。

本研究における実験用水は人工尿を模擬するために、濃度0.9%の塩水を用いる。一方、画像を二値化処理し易くするため、実験用水を着色する。流量は約 6 ml/s である。注水方法は人間の排尿を模擬し何回か繰り返し、一回の注水後10–15分間放置する。

実験条件は室温（ 25 ± 2 ）℃、湿度（ 55 ± 10 ）%RHで、液体温度も室温と同一とした。

1回の注水で1コマ/sで30枚、1コマ/3sで10枚、1コマ/6sで10枚、1コマ/30sで10枚、1コマ/120sで10枚の間隔で連続撮影し、最大600枚の連続画像が撮られる。CCDカメラから取り込まれた画像は画像入力ボードにより、パソコンに取り込まれる。CCDカメラで入力した試料画像の画素数は 640×480 で、解像度は $0.0311 \text{ mm}^2/\text{画素}$ である。

CCDカメラから取り込まれた連続動画に対して、しきい値を設定し、画像を二値化処理し演算して、紙おむつにおける水分移動に関する3種類の特徴曲線を得る[2]。

曲線1、表面残留水（Remained water）曲線：紙おむつに液体を注いでから、奥まで浸透しない間に、紙おむつの表面に留まる液体の面積が時間につれて変化する曲線である。

曲線2、拡散水（Diffused water）曲線：紙おむつへ注水すると、その画像のしきい値の分布は液体の移動につれて変化するが、時間の経過により最終的には平衡状態に達し、このときに輝度値のヒストグラムは安定状態になる。拡散水曲線は次回の平衡状態のヒストグラムのしきい値（右端値）と前回の平衡状態のその値の差が時間につれて線形変化するものと仮定し、面積を計算して得

るものである。この曲線は紙おむつにおける液体の拡散の状況を直接的に表す。

曲線3、吸収水（Absorbed water）曲線：サンプルへの未注水時の輝度値255よりやや小さい値の252をしきい基準として二値化を行なって得る曲線である。この曲線はサンプルの中に吸収された液体によって占拠された面積が時間につれて変化することを表す。

3. 結果と考察

3.1 小注水量による液体拡散の初期挙動

布の風合いに関連する基本力学特性を究明するには、微小応力下での繊維の初期変形特性を研究しなければならないように[4]、紙おむつにおける液体拡散の機構を解明しようとするには、小注水量での紙おむつにおける液体拡散の初期挙動を調べる必要がある。このため、サンプルAを例として、注水量を $20 \text{ ml} \times 3$ 回、流量を約 6 ml/s として実験を行った。サンプルAの特徴曲線を図1に示した。

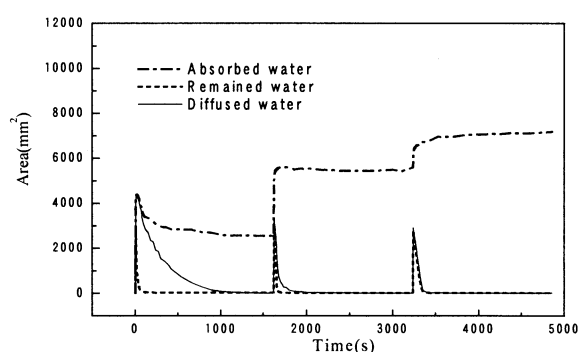


Fig.1 Feature curves of sample A with salt water

図1の吸収水曲線から、一回目に注水した吸収水の面積はピーク値に達した後、減少する過程が出るが、2回目以降の吸収水曲線にはその過程がないことが分かる。もし注水量をこれ以上増加すると、たとえば 30 ml/回 にした場合、一回目の注水でも、吸収水曲線の減少する様子は認められなくなる。この現象により小注水量での紙おむつにおける液体拡散の初期挙動を調べる必要性が重要である事が明らかになった。

3.1.1 液体拡散の経路

図1に示すように、液体を注ぐと吸収水曲線はほぼ直線的に迅速に増加してピークに達する。この事実から紙おむつに注水すると、まず液体はトップシートと吸水紙を通じて素早くパルプに吸収され、この段階では垂直方向への拡散より、水平方向への拡散が主となると考えられる。吸収水曲線はピーク値に達してから下り出し、最後に一定値になる。吸収水曲線はサンプルに吸収された液体によって占拠された面積が時間につれて変化することを表すため、吸収水曲線の減少する事実は、水分が時間の経過に従い、紙おむつの深層へ拡散していくことを示している。即ち、垂直拡散の挙動が起こっていると考えられる。ただし、一回の注水量を多くした場合、液体の垂直拡散の挙動が起こるが、2次元の画像でははっきり表わすことはできない。上記の検討の結果より、紙おむつにおける液体拡散の方式はまず水平方向へ、後に垂直方向へと進行すると判断できる。この結論は非常に重要である。なぜなら、水平方向への液体拡散の良し悪しは垂直方向への拡散に直接的な影響を与えるからである。

3.1.2 液体拡散のメカニズムの解析

さて、図1において一回目に注水した最初の2分間の特徴曲線を拡大して図2に示す。

図2に示すように、吸収水曲線はピーク値に達した後に、すぐ減少するのではなく、暫くの間は一定の状態を保持してから下り出す。そのピーク値を保持して変わらない時間をピーク値保持時間 T_k と定義する。一方、拡散水曲線の場合は吸収水曲線とほぼ同様であるが、二つの異なる点がある。(1) ピーク値保持時間は拡散水曲線の方が短い。(2) 拡散水曲線は最終的にゼロに収束する。

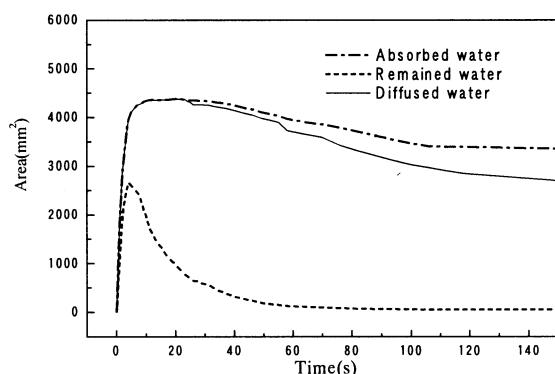


Fig.2 Feature curves in the early stage of sample A

拡散水曲線により、液体拡散のメカニズムを以下のように説明する。紙おむつの構成はメーカーによって多少異なるが、一般には表面材、吸収材、防水材からなる[5]。吸収材は紙おむつの核心体として、粉碎パルプ、吸収紙、高吸水性ポリマーの組合せで構成されている[6]。一部の革新的なデザインでは、表面材としてのトップシートの下にアキュジション層(Acquisition

layer)、またはアキュジション層+トランスポート層(Transport layer)が設けられている[7]。これらのデザインは液体をもっと効率よく輸送、拡散させるため工夫されるものと思う。第一報[2]では紙おむつにおける液体の保有状態を二種類に分けた。高吸水性ポリマーに吸収された液体は広義的に言えば化学的結合水で、加圧しても外部に排出されないが、パルプに入った液体は物理的結合水で、圧力をかけると外へ簡単に排出される。既に、トップシートはドア、ポリマーは貯水池、パルプは液体の輸送パイプのように、紙おむつの液体吸収過程は貯水システムのようなものであると論述した[2]。ここでは、液体拡散のメカニズムを解析するために、紙おむつの構成を役割別に拡散層と吸収層と防水層に分ける。拡散層とはトップシートと吸水紙と粉碎パルプおよびアキュジション層、トランスポート層などの添加層を含み、液体の輸送、拡散を主な役割とする。一方、吸収層はポリマーあるいはポリマーと粉碎パルプの混合物を主として、液体の吸収、保持を主な役割とする。

ここで、拡散層の厚さは液体吸収して膨張した紙おむつの厚さに比べて無視できる。先述したように、紙おむつに液体を注ぐと、液体はまず拡散層に入り、素早く水平方向へ拡散される。その後液体が吸収層まで到達すると、上層にあるポリマーに吸収される。上層にあるポリマーは液体を吸収してから膨張を始める。膨張したポリマー粒子間に隙間が出来る。これらの隙間は液体の吸収体深層へ拡散し続ける通路になる。今までの研究により[7]、ポリマーは液体の吸収を主とするが、本研究より液体吸収以外に、液体が垂直方向へ拡散するために、重要な役割を果たすことがわかる。

図2に示す、拡散水曲線のピーク値保持時間 T_k はポリマーが膨張して、体積を増大させるのに要する時間と深く関連している。というのは上層にあるポリマーの膨張が完了すると、液体は深層へ拡散して、曲線は下り出すからである。周知のように、高吸水性ポリマーの体積変化に要する時間(T)は、ゲルの特徴的な長さを(L)とすると、下式の関係にある[8]。

$$T = L^2 / D \quad (1)$$

ここで、Dはゲル網目のコレクティブな拡散係数である。この式より、ポリマーの体積変化に要する時間(T)は、ゲルの特徴的な長さ(L)の2乗に比例する。それ故、拡散水曲線のピーク値保持時間はサンプルに入るポリマー粒子の大きさと関連していると考えられる。

ただし、(1)式はポリマー粒子一つにとって成立するものであるが、拡散水曲線のピーク値保持時間は紙おむつの上層にあるポリマー集合体の挙動により出るものである。両者には区別もあるし、関連もある。拡散水曲線のピーク値保持時間はポリマーの大きさにもポリマーの含量にも関係する。すなわち、ピーク値保持時間 T_k は粒子径 L と粒子の量 Q との関数である。どのような関数関係になるか、課題として研究する必要がある。表2に各サンプルの拡散水曲線のピーク値保持時間をまとめる。

表2のデータにより、SAPの量が一番少ないサンプルE(表1)よりも、サンプルCのピーク保持時間の平均値も最大値も小さい現象は粒子径の大きさと関連があると思う。液体の吸収速度はポ

リマーの化学組成と直接関連がある以外に、粒子径にも大きな影響を与えられる。一般的に、ポリマーの粒子径が小さければ、表面積が大きくなり、液体との接触面積も大きくなるので、吸収速度が速くなると考えられる。しかし、粒子径があまり小さすぎるとゲルブロックが生じるため、吸収速度が逆に低下する [7]。液体拡散の視点から見ると、ポリマーの粒子径は大きくした方がよい。粒子間の隙間サイズは粒子径と関係があるからである。一方、サンプル B のピーク値保持時間が最も長いことがわかる。サンプル B に入っているポリマーが最も多い (表 1) ことに対応している。

Table 2 Keeping time of peak value (unit: s)

Sample Amount of pouring	A	B	C	D	E
20ml×3times	21	33	25	24	23
30ml×3times	24	32	17	27	21
40ml×3times	35	34	29	23	29
50ml×3times	42	40	31	36	23
60ml×3times	43	46	20	32	43
70ml×3times	38	55	26	44	34
80ml×3times	36	60	31	30	35
90ml×3times	32	45	32	32	33
The mean	34	43	26	31	30

以上をまとめると、液体の水平方向への拡散は主に拡散層において行われ、垂直方向への拡散は主に吸収層において行われるのである。

3.2 水平拡散の動力学モデル

前述したように、紙おむつに水を注ぐと、液体はまず拡散層に入り、素早く水平方向へ拡散される。特徴曲線 (図 2) において、吸収水曲線の直線的に上昇する部分によりこのことが証明された。明らかに、この上昇の直線の傾き $\frac{ds}{dt}$ (単位: mm^2/s) は水平方向へ拡散する真のスピードである。図 2 に示すように、このスピードはほぼ時間につれて変わらない定数である。それを水平拡散速度と定義し、 V_w で表示する。

Table 3 Diffusion rate in horizontal direction (unit: mm^2/s)

Sample Amount of pouring	A	B	C	D	E
20ml×3times	1116	923	833	1232	1032
30ml×3times	1091	1011	821	1241	996
40ml×3times	1098	1013	943	1253	964
50ml×3times	1028	1068	968	1170	1002
60ml×3times	1018	1037	946	1101	1039
70ml×3times	954	1040	851	1143	956
80ml×3times	951	980	878	981	1043
90ml×3times	976	1020	860	985	952
The mean	1029	1011	886	1176	998

実験による各サンプルの水平拡散速度を表 3 にまとめる。特定のサンプル (例えばサンプル A) に対して、各回の注水量を増大しても、あまり変化はないことがわかる。

液体は紙や不織布のような多孔性媒体と接触すると、その瞬間から液体が自発的に浸透拡散する。拡散させる原動力は重力又は別の外力ではなく、細孔中に形成される気-液界面の圧力差から生じる毛細管浸透力である。多孔性物体の浸透動力学により、紙や布のような薄い多孔性媒体の中へ液体がぬれ広がる現象は、流れの方向によって“一方向の浸透”と“放射状浸透”に分けて議論される [9]。しかし、紙おむつの場合では、上記の二つのモデルを直接に利用するわけにはいかない。紙おむつの拡散層はトップシートと吸収紙と粉砕パルプなどからなり、単一的な紙や布などより構成が複雑であり、更に重要な点は検討の対象とするものが、液滴ではなく連続の液流の点である。紙おむつの拡散層はトップシートと吸収紙と粉砕パルプなどからなるために、単一の紙や布に比べると、繊維がランダムに配向している [10] から、紙おむつの吸収層は水平方向に均質等方体と考えられる。前述したように、拡散層の厚さは液体吸収して膨張した紙おむつの厚さに比べて無視できる。図 3 のように、紙おむつの吸収体の空間を、同一の原点で放射的に配列した無数の毛細管からなる円盤と仮定する。

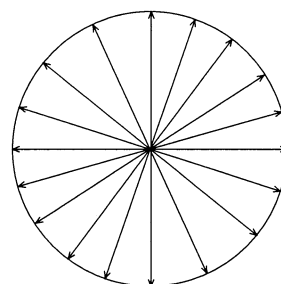


Fig.3 Model of horizontal diffusion

Lucas と Washburn の単一毛細管モデルにより、液体フロントの進行距離と時間の関係を次式で現わすことができる [9]。

$$l^2 = \frac{R_c \gamma \cos \theta}{2\mu} t \quad (2)$$

この式を L-W 式と略称する。ここで、 l は t 時間後の浸透距離、 R_c は毛管半径、 θ は液体と毛管内壁の見かけの前進接触角、 γ と μ それぞれ浸透液の粘度と表面張力である。 t 時間後の浸透面積を S とすれば、次式が成り立つ。

$$S = \pi l^2 = \frac{\pi R_c \gamma \cos \theta}{2\mu} t \quad (3)$$

(3) 式から、浸透面積 S は時間 t の一次関数になることがわかる。これは実験の結果と一致する (図 2)。次に、上式を微分すると、水平拡散速度 V_w が求められる。

$$V_w = \frac{ds}{dt} = \frac{\pi R_c \gamma \cos \theta}{2\mu} \quad (4)$$

γ と μ は浸透液の粘度と表面張力を表し、何れも液体に関連するので、この二つのパラメータをパラメータ λ に統合し、 $\lambda = \gamma/\mu$ 。この λ を液体特性係数と定義する。同様に、 R_c と $\cos \theta$ は何れも吸収体の構造に関連するので、それを σ に統合し、 $\sigma = R_c \cos \theta$ 。この σ を吸収体の構造係数と定義する。こうすると、水平拡散速度 V_w は次式で表わされる。

$$V_w = \frac{\pi}{2} \lambda \sigma \quad (5)$$

(5) 式から、注いだ液体が決まれば、水平拡散速度 V_w は吸収体の構造係数 σ のみに影響されることがわかる。吸収体の構造係数 σ は材質の親水性やパルプの繊維、長さ、空隙率などの因子を含んでいる。これらの因子の調節により、水平拡散速度 V_w が変えられる。なお、上式で紙おむつの構造を分析することができる。たとえば、前述したアキュジション層やトランスポート層などの添加層は一体どの程度に拡散性能を向上させるか、水平拡散速度 V_w を測定すれば、よくわかると思う。

注水速度を考える場合、水平拡散速度は次式で表わされる。

$$V_w - V_F = \frac{\pi}{2} \lambda \sigma \quad (6)$$

ここで、 V_F は注水速度の水平方向の成分である。

3.3 垂直拡散の動力学解析

前述したように、紙おむつにおける液体の垂直方向への拡散は吸収層で行われる。液流はポリマーに吸収されながら、奥へ浸透して行くため、液体の垂直方向への拡散挙動は水平方向への拡散よりずっと複雑である。紙おむつに入れるポリマーの粒子径は通常 $80 \sim 100 \mu m$ であるから、その吸収層は直径 $80 \sim 100 \mu m$ の粒子からなる多孔体とみなすことができる [7]。

多孔体中の流動現象は D'Arcy の経験式で示される [11]。

$$K = \frac{Q/A}{\Delta P/L_0}$$

ここで、 Q は多孔体を通る流量、 A は断面積、 ΔP は圧力差、 L は多孔体の厚さ、 K は透過率である。明らかに、式の中の Q/A は流動速度 U である。

関連の文献 [7] により、高吸水性ポリマーからなるゲル層にとって、多孔体の空隙率や表面積などの因子を考慮に入れる場合、流動速度 U は D'Arcy 式に基づいた Kozeny-Garman 式で表わされる。

$$U = \frac{\varepsilon^2 \Delta P}{k_0 (1 - \varepsilon)^2 S_p^2 \eta L_0}$$

ここで、 ε は膨潤ゲル層の空隙率、 k_0 は比例係数、 S_p は単位体積の膨潤ゲルの比表面積、 η は流体の粘性率である。この式から多孔体の空隙率が大いほど、液体に対する透過性が高い。明らかに多孔体の空隙率はポリマーの粒子径と関連する。

ところが、紙おむつの液体拡散の動力学を研究する場合、上式では不十分になる。この式は速度と時間の関係を表わしていない

からである。また、この式において、多孔体の空隙率 ε を時間に依存しない定数と仮定して導出されたものである [12]。実際の紙おむつの場合では、多孔体の空隙率 ε と比表面積 S_p は液体の吸収に伴って変わる。即ち、両方とも時間 t の関数である。

ポリマーを主とする吸収層で行う液体の吸収、拡散挙動は非常に複雑である。吸収層の吸収速度は主に次の4つの因子によって支配されている。①ポリマー粒子における流体境膜内の物質移動速度；②ポリマー粒子内の拡散速度；③ポリマー粒子内の細孔表面への吸着速度；④毛細管作用によるポリマー粒子間での液体の移動速度 [7, 13]。これらの複雑な因子を数学関係式で総括して表わすことは、今の研究段階では困難である。しかし、それにもかかわらず、実験の手段により垂直方向への水分拡散の曲線が得られる。図4は各サンプルの一回目注水後の拡散水の面積が時間につれて減少する曲線である。明らかに、これは垂直方向への水分拡散の曲線である。実験条件は、注水量：50 ml/回、流量：6 ml/秒である。

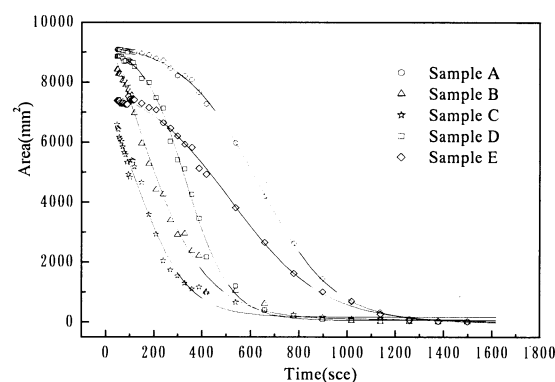


Fig.4 Variation of diffused water area with time

図4に示すように、実験データは Boltzmann 関数でフィットできる ($R^2=0.990-0.999$)。それ故、垂直拡散に関する厳密な数学関係式が書き表せないにもかかわらず、これらの実験曲線により液体拡散の様子が分析できる。図4の曲線を微分すると、垂直拡散の速度曲線が得られる (図5)。

この速度曲線により、垂直拡散の最大速度と拡散速度がゼロに収束する時間などの重要な情報が得られる。

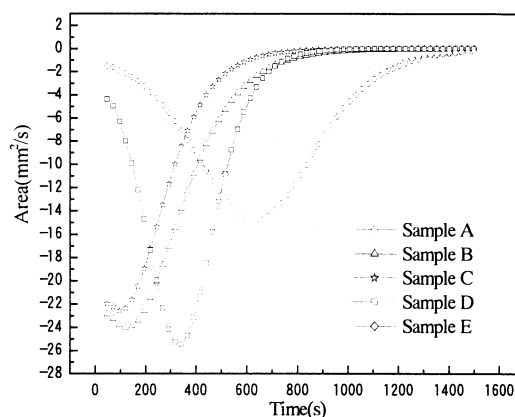


Fig.5 Rate of diffused water area in the vertical direction

3.4 特性値の再検討

第一報 [2] では、液体移動の特徴曲線からの4つの特性値（水平方向拡散率 F_w 、垂直方向拡散率 F_h 、最大面積率の平均値 $\overline{S_m}$ と残留面積率の平均値 $\overline{S_r}$ ）を新たに定義した。これらの特性値で客観的にサンプルの液体拡散特性の差異が表わされることは実験のデータにより証明された。一方、液体拡散に対して動力学的解析したうえで、特性値を再検討する必要があると思う。

3.4.1 水平方向拡散率 F_w と水平拡散速度 V_w

水平方向拡散率 F_w は下のとおりに定義された [2] :

$$F_w = \frac{\sum A_i / N}{A}$$

ここで、 A_i は注水時の拡散水曲線のピーク値、 $i=1, 2, \dots, N$ 、 N は注水の回数で、 A は画像の最大有効面積(定数)で、本実験では 9550 mm^2 である。 F_w の範囲は $0 \leq F_w \leq 1$ であり、その値の大きさは、液体が水平方向へ拡散する容易さを表す。一方、水平拡散速度 V_w は 3.2 節において述べたように、水平方向へ拡散する早さを表す。3.1.1 節に検討したように、紙おむつにおける液体拡散の経路はまず水平方向へ、後に垂直方向へと進行する。水平方向への液体拡散の良し悪しは垂直方向への拡散に直接的な影響が出る。それ故、水平方向への拡散を評価するとき、拡散のスピードより、拡散水が占拠する面積の方が更に重要だと考えられる。たとえば、表3の示すようにサンプルEの水平拡散速度はサンプルBとの差はあまり大きくないが、両者の水平方向拡散率は比較的大きな差が存在した（Bは0.77、Eは0.60である）[3]。その結果、拡散の総合評価ではサンプルEはサンプルBと比べ、悪いと言える。

以上の理由に基づき、サンプルの評価値として、水平方向拡散率 F_w を薦める。その一方、水平拡散速度 V_w は研究の手段の一つとして、有用な指標と言える。

3.4.2 垂直方向拡散率 F_h について

垂直方向拡散率 F_h は下のとおりに定義された [2] :

$$F_h = \log(\sum k_i / N)$$

ここで、 k_i は拡散水曲線が減少する傾き、 $i=1, 2, \dots, N$ 、 N は注水の回数である。この傾きは拡散水曲線ピークの高さの中間点の傾きである。本報の研究により図5に示す速度曲線を得た。この垂直拡散の速度曲線から、速度の最大値 V_{hmax} でサンプルを評価するのは、より良い方法と考えられる。図4と図5を比較すると、各サンプルのピークの高さの中間点の傾きは速度の最大値 V_{hmax} と同様な値となっている。それ故、 F_h は参考となるデータと言える。

また、理論の上では垂直拡散の速度がゼロになることは液体の吸収、拡散が平衡に達するのを意味している。そのために、図5において、拡散速度がゼロに収束する時間を拡散収束時間 T_0 として定義する。明らかに拡散収束時間 T_0 はサンプルの特性研究にも有用な指標となる。

4. 結論

有色塩水による紙おむつにおける液体拡散の動力学的解析により、以下の結論が得られた：

- (1) 紙おむつにおける液体拡散の経路はまず水平方向へ、後に垂直方向へと進行する。液体の水平方向への拡散は主に拡散層において行われ、垂直方向への拡散は主に吸収層において行われる。
- (2) 水平方向への拡散の動力学モデルは紙おむつの吸収体の空間を同一の原点で放射的に配列した無数の毛細管からなる円盤と仮定するものである。水平拡散の速度式は下のとおりである。

$$V_w = \frac{\pi}{2} \lambda \sigma$$

- (3) 膨潤したポリマーからなる多孔体の空隙率 ε と比表面積 S_p は両方とも時間 t の関数であるため、Kozeny-Garman 式は紙おむつの液体垂直拡散の動力学的解析にとって不適用である。一方、実験データより垂直拡散の速度曲線が得られる。
- (4) 垂直方向拡散率 F_h を垂直拡散速度の最大値 V_{hmax} に替えて、サンプルを評価した方が良い。また、評価の指標とする特性値以外に、特性曲線からピーク値保持時間 T_k 、水平拡散速度 V_w 、拡散収束時間 T_0 などのデータが得られ、製品の性能を分析するための豊富な情報を提供可能である。

References

- [1] Toyoda, H.; Jpn. Res. Assn. Text. End-Uses, **41**, 281 (2000)
- [2] Yang, XQ., Yang, MZ., and Matsudaira, M.; J. Text. Mach. Soc. Japan, **56**, T67(2003)
- [3] Yang, XQ., Yang, MZ., and Matsudaira, M.; J. Text. Mach. Soc. Japan, in press (2004)
- [4] Matsudaira, M., et.al; "Textile Science in 21 Century" Text. Mach. Soc. Japan, p.89 (2003)
- [5] Toyoma, K.; Jpn. Res. Assn. Text. End-Uses, **30**, 42(1989)
- [6] Masita, B.; "Super Absorbent Polymer" Kyoritsu Shuppan Co., p.81 (1987)
- [7] Wang, L., and Rezai, E.; "Development of Functional Polymer Gel", CMC Co., p. 109 (1995)
- [8] Japan Chemical Society, "Modern Interfacial Colloid Chemistry", Maruzen Co., p. 85 (2002)
- [9] Ishii, Y., Koishi, M., and Tsunoda, M.; "Handbook of Wetting Technology", Techno System Co., p. 447 (2001)
- [10] Textile Machinery Society of Japan, "Basic Fiber Engineering", J. Text. Mach. Soc. Japan, vol.1, p.107 (1968)
- [11] Koishi, M., and Kurematsu, K.; "New Impregnation Technology and Its Application", Techno System Co., p.59 (1990)
- [12] Japanese Hydrodynamics Meeting, "Hydrodynamics Handbook", Maruzen Co., p.1054(1998)
- [13] Kondo, S., et.al; "Adsorption Science", Maruzen Co., p.83 (2002)