

吸放湿繊維材料内の水蒸気及び熱移動に関する研究

荻野 毅

2014年5月

# 目 次

## 使用記号

第1章：緒論	1
1. 1 はじめに	1
1. 2 吸放湿繊維材料に期待される機能及び本研究の課題	2
1. 3 本論文の構成及び内容	2
第2章：相対湿度変化に伴う吸放湿繊維材料の熱伝導率及び吸脱着熱量の測定	5
2. 1 はじめに	5
2. 2 実 験	5
2. 2. 1 試料	5
2. 2. 2 方法	7
2. 2. 3 測定条件	10
2. 3 結果	12
2. 3. 1 熱伝導率結果	12
2. 3. 2 吸脱着熱量結果	14
2. 4 考 察	24
第3章：吸放湿繊維材料の水蒸気及び熱移動に関する実験的研究	26
3. 1 はじめに	26
3. 2 水蒸気の拡散と熱移動を制御できる実験装置の作製	26
3. 3 吸放湿繊維材料と吸放湿を有さない繊維材料の表裏温度変化の測定	28
3. 3. 1 実験条件 I (不織布)	28
3. 3. 2 実験条件 II (ニット)	29
3. 4 結果	30
3. 4. 1 実験条件 I (不織布) の実験結果	30

3. 4. 2	実験条件Ⅱ（ニット）の実験結果	34
3. 5	見かけの熱伝導率 $\lambda_{app}$ による保温性の評価	37
3. 6	考察	38
第4章	吸放湿繊維材料の水蒸気及び熱移動に関する数値解析	40
4. 1	まえがき	40
4. 2	解析モデル	41
4. 2. 1	基礎方程式	41
4. 2. 2	境界条件および初期条件	43
4. 3	数値解析結果及び考察	43
4. 3. 1	各層の熱物性値及び諸元	43
4. 3. 2	試料の水分吸湿量	44
4. 3. 3	数値解析結果例	44
4. 3. 3. 1	DHL あるいは吸脱着がない試料の計算例	45
4. 3. 3. 2	WHL での計算例（CASE A の場合）	46
4. 3. 3. 3	WHL での計算例（CASE B の場合）	48
4. 3. 3. 4	実験結果と数値計算（CASE C の場合）の比較例	51
4. 4	まとめと問題点	53
第5章	吸放湿繊維材料の水蒸気及び熱移動に関する赤外熱画像による 可視化と数値解析	54
5. 1	まえがき	54
5. 2	実験	54
5. 2. 1	試料	54
5. 2. 2	方法	55
5. 3	結果	58
5. 3. 1	DHL の条件時	58

5. 3. 2	WHL I の条件時	60
5. 3. 3	WHL II の条件時	63
5. 3. 4	chamber 間の温湿度差と試料間の温度差との相関関係	65
5. 4	ニット (AKN と EKN) での数値解析	67
5. 4. 1	数値解析モデル	67
5. 4. 2	数値解析結果	68
5. 5	考察	70
第6章 本論文のまとめ		72
謝辞		75
参考文献		76
付録		A-1

## 使用記号

- $A'$  : 繊維試料の単位体積あたりの吸脱着有効面積, [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]
- $C$  : 空気の水蒸気濃度, [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $C_s$  : 繊維試料と吸着平衡にある空気の水蒸気濃度, [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $c$  : 各層の比熱, [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
- $D$  : 水蒸気の拡散係数, [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $D_{air}$  : 空気への水蒸気の拡散係数, [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $D_{app}$  : 試料層への水蒸気の見かけの拡散係数, [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $h'$  : 物質伝達係数, [ $\text{m}/\text{s}$ ]
- $\dot{m}$  : 繊維試料の単位時間, 単位体積当たりの吸脱着水分量, [ $\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^3)$ ]
- $\dot{q}$  : 繊維試料の単位時間, 単位体積当たりの吸脱着熱量, [ $\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m}^3)$ ]
- $RH$  : 相対湿度, [%]
- $T$  : 温度, [K]
- $t$  : 時間, [s],[h]
- $W$  : 繊維試料の水分量, [ $\text{kg}/\text{kg}'$ ]
- $x$  :  $x$  方向座標, [m]
- $\alpha$  : 熱拡散率, [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $\gamma$  : 繊維試料の吸脱着熱量, [ $\text{J}/\text{kg}$ ]
- $\delta$  : 各層の厚さ (Fig.4-1) , [m]
- $\lambda$  : 熱伝導率, [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
- $\lambda_{app}$  : 繊維試料の見かけの熱伝導率, [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]
- $\rho$  : 密度, [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

## 添え字

- (ai) : 空気層 ( $\delta_1$ ) 入口
- (ao) : 空気層 ( $\delta_5$ ) 出口

- (1) : 纖維試料層 ( $\delta_3$ ) 入口
- (2) : 纖維試料層 ( $\delta_3$ ) 出口

# 第1章 緒論

## 1. 1 はじめに

衣服の快適性や省エネの観点から注目されている吸湿発熱素材の水蒸気及び熱挙動の研究結果について報告する。吸湿発熱素材は、日本提案型の機能特性であり、冬物衣料には欠くことのできない考え方である。人体の生理現象に目を向けると、人体からは常に水蒸気（不感蒸泄）が発生しており、その蒸発性熱放散は、汗1mlの蒸発により約0.67Wの熱を奪い取ることになる。人体の比熱を0.83とすれば、100mlの水蒸気により成人男性の体温を約1°C下げることに匹敵する(Fig.1.1)文献[1, 2]。成人の体表の不感蒸泄量は約600～700ml/日あり、体熱放散における不感蒸泄の大きさは決して小さくない。特に冬場を想定した場合、この水分を効率良く熱に位相転換し保温性のプラス因子にさえればより温かく省エネ効果を有する衣服設計[3]が可能となる。

一方 2010 年以降、わが国繊維産業界は、繊維製品の JIS 規格や固有の繊維評価法を ISO 規格へ変更すべく積極的な活動を行っており、新たに吸湿発熱素材の評価方法に対する提案や試験方法の改定を推進している。その吸湿発熱素材の評価方法を要約すれば、絶乾状態の試料を多湿状態に移動させた時に水分吸着によって発生する、吸着熱による温度上昇を計測する方法である。

しかし、衣服の実着用を想定した場合、初期の発熱現象だけを捉えるのではなく、その後の定常的状态や準定常的状态[4]での発熱の有無や発熱持続による保温効果の方がむしろ重要である。また、同時に、これらの効果を導く環境条件等の検証も大切である。

そこで、これらの課題を明確にする為、本研究では、調温調湿可能な二つの chamber の間に吸放湿性を有する繊維材料と吸放湿を有さない繊維材料を並べ、非定常から定常的状态に至る水蒸気及び熱移動の実験的研究を 2 つの方法で行った。前者は、熱電対と湿度センサーによる測定、後者は、試料全面をサーモグラフィーによって計測する方法

である。更に、妥当な数値解析モデルを設定し、水蒸気の吸脱着熱を伴う一次元非定常熱伝導及び水蒸気拡散を考慮した数値解析を行い、試料界面の温度変化と水蒸気濃度変化の解析を試みた。

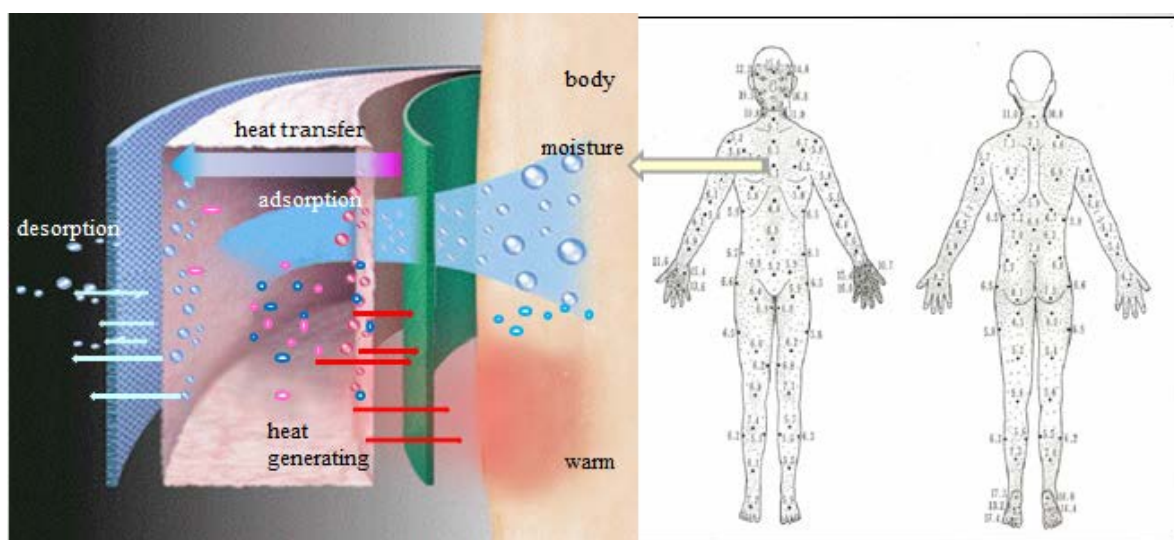


Fig. 1.1 Heat generating mechanism

## 1. 2 吸放湿繊維材料に期待される機能及び本研究の課題

熱力学平衡系における吸放湿繊維材料の吸脱着熱に関する評価方法や報告は、ここ最近、盛んであるが、実際の着衣条件での非定常から定常状態における水蒸気および熱移動についての伝熱学的研究はなされていない。よって、衣服設計及び衣服素材開発の観点からも、その解明が待ち望まれていた。

衣服の実着用を想定すると、衣服素材を介し少なくとも二つの異なる環境空間(衣服内外)が存在する。つまり、吸放湿繊維材料を介し、温湿度の高い空間から温湿度の低い空間へ、水蒸気及び熱移動が常態化し、両界面間は動的平衡状態になると考えられる。

従って、吸放湿繊維材料内の水蒸気及び熱挙動を解明するには、従来の繊維評価技術のみならず伝熱学的見地からのアプローチが必要となり本研究に至った。



### 1. 3 本論文の構成及び内容

本論文は6つの章で構成されている。第1章では、吸放湿発熱素材の研究開発の現状と動向及び伝熱学的研究の有用性について述べる。

また、各章に分けて記載した研究内容の概要について説明する。

第2章では、実験試料である親水性繊維の中でも最も吸放湿能力の高い塩型ポリアクリル酸系繊維(Salt of Polyacrylic Acid Fiber)の相対湿度変化に呼応する水分の吸脱着量を示す。また、実際の衣服材料の観点から、この繊維材料を50%混合した不織布 (Salt of Polyacrylic Acid- Nonwoven material: 以後 ANW と称する) 及び30%混紡したニット素材 (Salt of Polyacrylic Acid-Knit Fabric: 以後 AKN と称する)と吸放湿性を有さないポリエステル繊維100%の不織布 (Polyester- Nonwoven material: 以後 ENW と称する)及びニット素材 (Polyester-Knit Fabric: 以後 EKN と称する) の相対湿度変化に呼応する熱伝導率を測定した, 文献[5,6,7].

一方、吸放湿繊維材料の吸脱着熱量の発生機構は、繊維構造論の見地からも非常に関心の高い分野である, 文献[8,9]. よって、ここでは、吸放湿繊維材料の水蒸気吸脱着に伴う吸脱着熱量の大きさを計測した。更に、官能基当りの吸脱着熱量を試算し、吸着熱の発生機構を考察する。

第3章では、非定常から定常的状態における水蒸気の拡散及び熱移動を計測できる実験装置を作製し、吸放湿性を有する ANW 及び AKN と吸放湿性を有さない ENW 及び EKN の各試料表裏の温度変化を熱電対によって同時に計測する。水蒸気の無い状態での各試料表裏の温度分布は同等であるが、水蒸気を有する状態での各試料表裏の温度分布には明らかな違いが生じた。この吸放湿性を有する素材の僅かな温度上昇あるいは表裏温度差は保温性の差を示していると考えられる。よって、相対湿度変化に呼応する各試料の熱伝導率から「見かけの熱伝導率  $\lambda_{app}$ 」を試算し、定常的状態下での保温性について

て考察する, 文献[6].

第4章では, 定常状態においても保温性能の向上が示唆された第3章の結果を検証するために, 数値解析モデルを設定した, 文献[10].

実用的な衣服環境条件を想定すれば, 実験的には測定誤差内に留まる測定結果や僅かな測定差についても, 数値解析では, 有効な効果を予測出来るかもしれない.

よって, 本章では, 水蒸気の吸脱着熱を伴う一次元非定常熱伝導及び水蒸気拡散を考慮した数値解析による温度変化と水蒸気濃度変化の解析を試みる.

第5章では, これらの現象をより正確に検証する為に, 新たな実験装置を作製し, 吸放湿性を有する AKN と吸放湿性を有さない EKN の表面温度分布を点接触の熱電対に代えて, 試料全体を赤外熱画像カメラで長時間に渡って可視化し, 各試料全面の温度分布の推移を比較計測した. また, これら試料の温度推移が, 試料表裏の界面付近に生ずる温湿度条件とどのような相関を有するか算出し, 保温性への影響を考察する, 文献[11]. 更に, 第4章に基づく数値解析をニット素材に応用し検証した.

## 第2章：相対湿度変化に伴う吸放湿繊維材料の熱伝導率

### 及び吸脱着熱量の測定

#### 2.1 はじめに

ここでは、吸放湿繊維材料（塩型ポリアクリル酸系繊維：Salt of Polyacrylic Acid Fiber）の原綿 100%の吸脱着熱量及びこの繊維を 50%混合した不織布及び 30%混紡したニット素材の熱伝導率について計測を行った。前者は、数値解析時の諸パラメータ値に、後者は、熱流の一次元性の確認と見かけの熱伝導率の試算に適応する。

一方、吸放湿繊維材料の吸脱着熱量の発生機構は、繊維構造論の見地からも非常に関心の高い分野である、文献[8,9]。よって、ここでは、水分の吸脱着に呼応する吸脱着熱の大きさを計測し、繊維を構成する官能基の吸脱着熱量を試算する。

#### 2.2 実験

##### 2.2.1 試料

##### 2.2.1.1 不織布

測定試料は、塩型ポリアクリル酸系繊維を 50%含む不織布(Salt of Polyacrylic Acid-Nonwoven Material: 以後 ANW と称する)とポリエステル繊維 100%の不織布

(Polyester-Nonwoven Material: 以後 ENW と称する)を用いた、文献[5,6]。

Table 2.1 にそれぞれ試料の繊維組成と構造（厚さと重量）を示す。Table 2.2 は、相対湿度変化時（絶乾～90%RH）の各試料の水分率を示す。ここでの絶乾は、試料を乾燥器（105℃一定）の中で8時間放置した状態であり、水分率 0%とした。

Table 2.1 Composition and structure (thickness/weight) of samples

	<b>composition(%)</b>	<b>thickness(mm)</b>	<b>weight(g/m<sup>2</sup>)</b>
<b>ANW</b>	<b>pal/pet=50/50</b>	<b>3.70</b>	<b>370</b>
<b>ENW</b>	<b>pet=100</b>	<b>3.40</b>	<b>370</b>

Table 2.2 Moisture content of samples with relative humidity change at 25°C (kg/kg'×100)

%RH	0	10	30	40	60	80	90
<b>ANW</b>	<b>0.0</b>	<b>10.8</b>	<b>15.5</b>	<b>16.4</b>	<b>17.7</b>	<b>22.9</b>	<b>32.2</b>
<b>ENW</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.5</b>

### 2. 2. 1. 2 ニット

測定試料は、塩型ポリアクリル酸系繊維を 30%含むニット素材(Salt of Polyacrylic Acid-Knit Fabric: 以後 AKN と称する)とポリエステル繊維 100%のニット素材 (Polyester-Knit Fabric: 以後 EKN と称する) を用いた、文献[7]. Table 2.3 にそれぞれ試料の繊維組成と構造 (厚さと重量)を示す. Table 2.4 は、相対湿度変化時 (絶乾~90%RH) の各試料の水分率を示す. ここでの絶乾条件は、上記、不織布と同様である.

Table 2.3 Composition and structure (thickness/weight) of samples

	composition(%)	thickness(mm)	weight(g/m <sup>2</sup> )
<b>AKN</b>	<b>pal/pet=30/70</b>	<b>1.21</b>	<b>212.5</b>
<b>EKN</b>	<b>pet=100</b>	<b>1.10</b>	<b>193.4</b>

Table 2.4 Moisture content of samples with relative humidity change at 25°C (kg/kg'×100)

%RH	0	10	30	40	60	80	90
<b>AKN</b>	<b>0.0</b>	<b>3.6</b>	<b>6.3</b>	<b>7.6</b>	<b>8.9</b>	<b>15.2</b>	<b>20.5</b>
<b>EKN</b>	<b>0.0</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>1.1</b>

### 2. 2. 1. 3 原綿

試料は、塩型ポリアクリル酸系繊維(Salt of Polyacrylic Acid Fiber:以後 AF-Na と称する) と塩型ポリアクリル酸のほぼ全ての官能基をカルボン酸に置換させた繊維 (Polyacrylic Acid Fiber:以後 AF-H と称する) の 2 種類である. サンプル重量は、

共に 0.07g で，繊維仕様は，共に 2.4 dtex×33mm である． Fig.2.1 に AF-Na の高架橋を有する構造体を示す． なお， AF-H の構造体もほぼ等しく， COONa を全て COOH に置換させた構造となる．

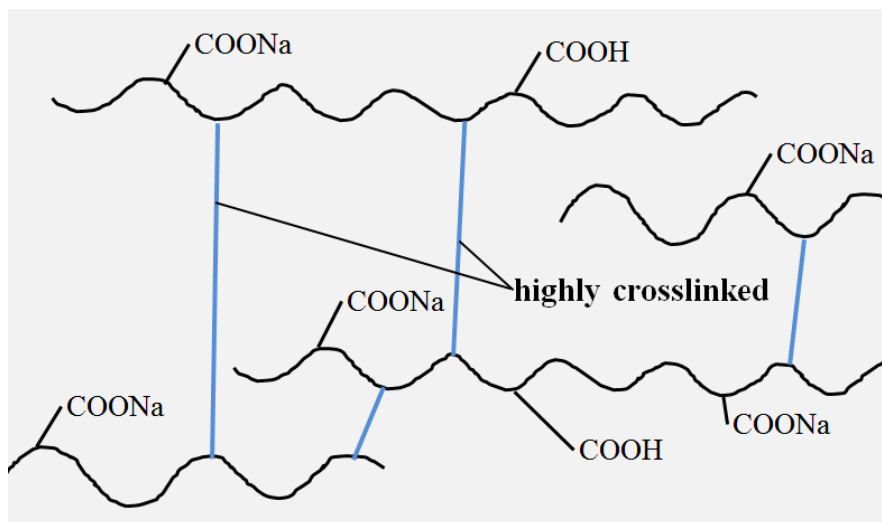
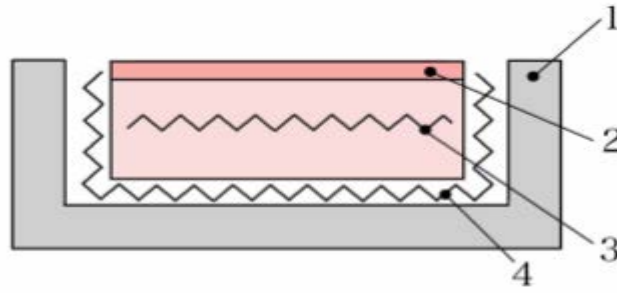


Fig.2.1 Schematic representation of a highly crosslinked AF-Na

## 2. 2. 2 方法

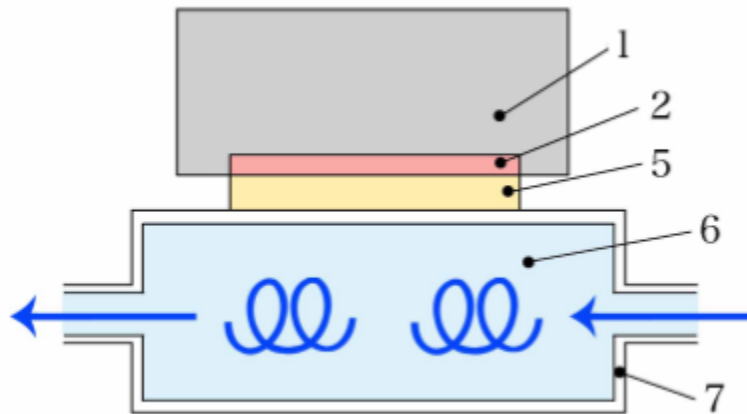
### 2. 2. 2. 1 熱伝導率測定装置

熱伝導率測定装置の熱源台（Bottom Temperature Box :以後 B.T.B.と称する）の概略図を Fig. 2.2 に示す． 試料は， Fig. 2.3 の恒温台（Water Box:以後 W.B.と称する）の上へ設置し， 試料の上に B.T.B.の heating plate が被さる状態となる． 熱は試料を通し B.T.B.から W.B.へ恒常的に伝播し， その損失熱量を計測する． この測定方法は， 繊維材料の標準的熱伝導率測定法であり， KES 法[12]と呼ばれる．



1.guard box 2.heating plate 3.main heater 4.guard heater

Fig. 2.2 Bottom Temperature Box(B.T.B.)



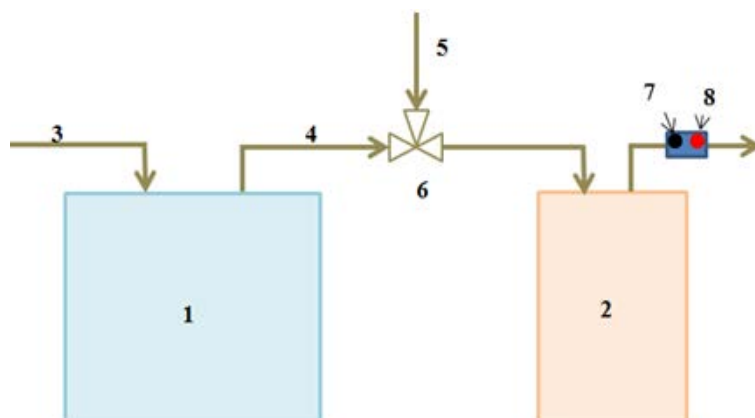
1.Bottom Temperature Box(B.T.B.) 2.heating plate 5. Sample  
6.water 7.water box

Fig. 2.3 Measurement of constant thermal conductivity

#### 2. 2. 2. 2 吸脱着熱量測定装置

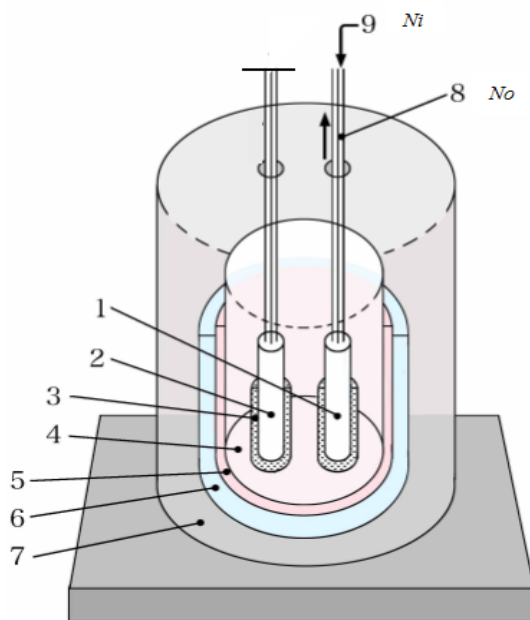
吸脱着熱量測定装置の概略図を Fig.2.4 に示す. Fig.2.4 の熱量計 2 は, SETARAM 社製 C-80 (仏製) の双子型熱伝導タイプ(Fig.2.5)である, 文献[13]. ガス流量は, 約 100ml/min である. Fig.2.4 の配管 5 からは, 絶乾窒素が送入され, 配管 4 からは, アルパック理工 (株) 製 HC-1 の湿度調整装置 1 を経由した調温調湿窒素が送入され, 実験条件に合わせ適宜バブル 6 を切替える. 湿度測定は, 精度の観点より 10%RH 未

満では露点計 7 を使用し，10%RH 以上では，新栄テクノロジー（株）の湿度計 8 を用いた。



- 1.Humidity control apparatus 2.Calorimeter(type:C-80)3.Inlet N<sub>2</sub> gas  
4.Humidity control N<sub>2</sub> gas 5.Absolute dry N<sub>2</sub> gas 6.valve  
7.Dew point recorder8.Humidity sensor

Fig.2.4 Schematic view of the device for measuring the quantity of adsorption heat and desorption heat



1. cell(sample) 2. cell(close) 3. Heat flux detectors 4. Calorimetric block  
5. Heating elements layer 6. Cooling layer 7. Insulation layer  
8. Outlet of N<sub>2</sub> gas 9. Inlet of control N<sub>2</sub> gas

Fig.2.5 Schematic view of the calorimeter (type C-80)

## 2. 2. 3 測定条件

### 2. 2. 3. 1 熱伝導率測定条件と手順

熱伝導率の測定条件を下記に示す

- ・ 温度： 25℃
- ・ 湿度条件： 10%RH, 30%RH, 50%RH, 80%RH
- ・ 試料の前処理条件は、塩化リチウム(LiCl)の吸湿作用(潮解)により、約10%RH(25℃一定)を確保したデシケーター中に24時間放置する、文献[14].
- ・ 別途、LiClを充填させたケース内に上記熱伝導装置をセットし、「25℃, 10%RH」条件下で、熱伝導率を測定する.
- ・ 次に熱伝導測定装置と試料を大型恒温恒湿槽内にセットし、「25℃, 30%RH」「25℃, 50%RH」「25℃, 80%RH」の各条件下で順次測定を行う.
- ・ 90%RH環境下の測定は、Heat plateとWater boxの間に結露が生じ断念した.

次に、熱伝導率の測定手順を記す.

- ・ 試料は、測定する各温湿度条件下に10h以上調湿する
- ・ 試料を素早くWater boxに乗せ、その上に素早くHeat plateを被せ計測する.
- ・ 計測時間は約5minである[12].

### 2. 2. 3. 2 吸脱着熱測定条件と手順

吸脱着測定条件を下記に示す.

- ・ 温度： 25℃
- ・ 湿度条件： 1%RH→10%RH→50%RH→80%RH→95%RH  
→80%RH→50%RH→10%RH→1%RH
- ・ 1%RH状態は、コールドエバポレーターの絶乾窒素(Fig.2.4-5)を直接送入し確保する.
- ・ 10%RH状態は、(Fig.2.4-3)からの乾燥窒素を(Fig.2.4-1)経由で送入する.



・ 50, 80, 95%RH 状態は, 湿度調整装置(Fig.2.4-1) の内部で, 乾燥窒素ガス (Fig.2.4-3)

とその乾燥窒素ガスを水中でバブリングした多湿窒素ガスの配合比を調整し確保する.

次に, 吸脱着測定手順を記す.

- ・ 試料の前処理条件は, 80℃の真空状態で 6h 行う.
- ・ 熱量計の cell(Fig.2.5-1)に試料を素早くセットし, 絶乾窒素(Fig.2.4-5)を流し, 熱量計のベースラインの安定性を確認する. もう一方の cell(Fig.2.5-2)は, 今回の実験では使用しない.
- ・ データ取り込み後に valve(Fig.2.4-6)を調整し, cell に流入する絶乾窒素(Fig.2.4-5)から 10%RH の乾燥窒素ガスへ切替える.
- ・ 試料の水蒸気吸着が平衡状態となり, 熱量計のベースラインがほぼゼロになったのを確認後, 次の湿度条件に切替える.
- ・ 湿度条件を変更した時点と吸着 (脱着) 平衡に達した点をベースラインとし, ベースラインと吸着 (脱着) のピークとで囲まれた面積を吸着 (脱着) 熱量とする.

### 2. 2. 3. 3 水分率測定条件

Fig.2.6 に相对湿度変化 (絶乾~95%RH) に呼応する各試料の水分率変化を示す. 測定条件は, 下記の通りである.

- ・ 温度 : 25℃
- ・ 絶乾状態の試料水分率は, 前処理条件 : 105℃×6h 後の試料重量をベースとし, 水分率 0 とした.
- ・ LiCl 半溶液[14]を利用し, 10%RH 状態にしたデシケーター内で, 試料を 48 時間調湿する.
- ・ 50, 80, 95%RH の試料水分率は, ナガノ科学製恒温恒湿槽内に気流の影響が生じないように試料をスクリーンメッシュで覆い 48 時間調湿した.

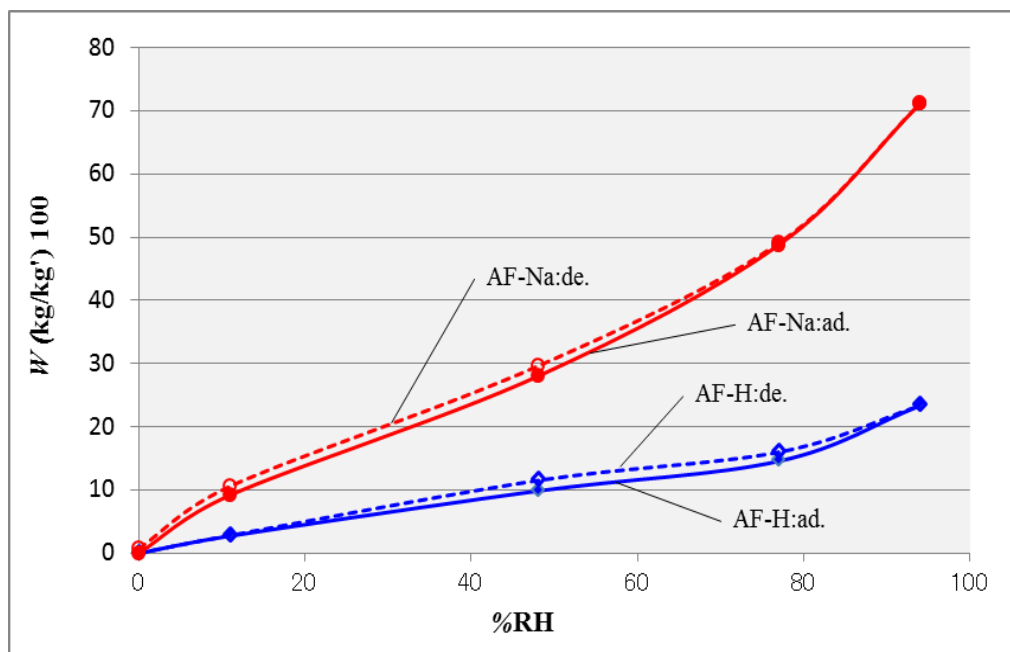


Fig. 2.6 Moisture contents in the samples associated with the relative humidity change at 25°C

## 2. 3 結果

### 2. 3. 1 熱伝導率結果

相対湿度約 10~85%時の「不織布 ANW 及び ENW」と「ニット AKN 及び EKN」の熱伝導率を Fig. 2.7, Fig. 2.8 に示す。相対湿度の増加に比例し吸放湿性に富む ANW 及び AKN は、熱伝導率の増加を示す。これは水分吸着によって、熱伝導率が増加したと考えられ、保温性の低下を示すものである。

一方、吸放湿の無い ENW 及び EKN は、相対湿度変化による影響をほとんど受けず、熱伝導率は、ほぼ一定である。よって、保温性もほぼ一定と云える。

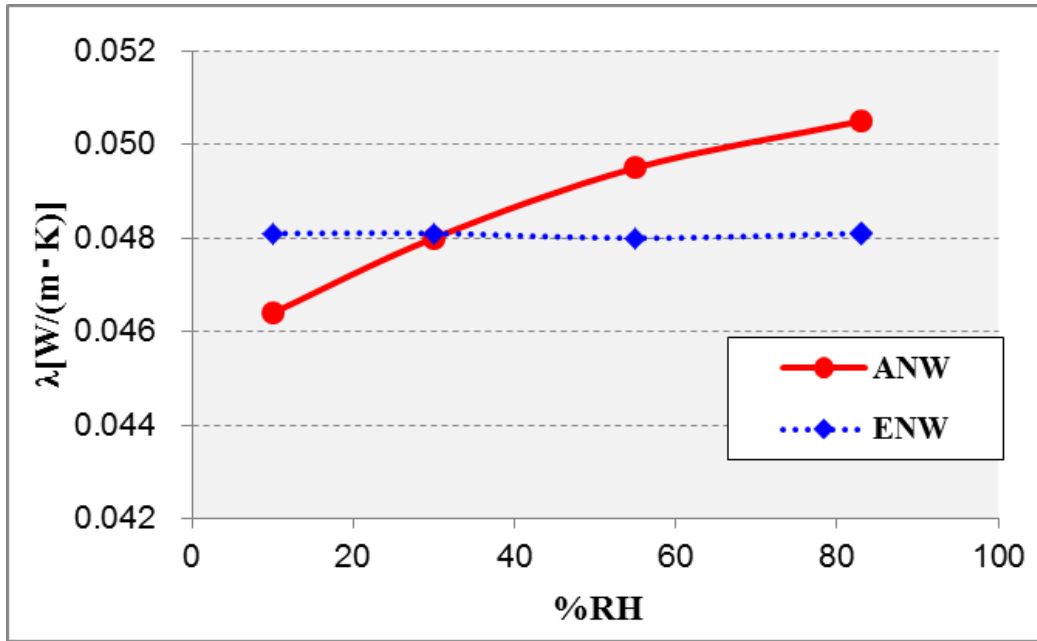


Fig. 2.7 Thermal conductivities of the ANW and ENW associated with relative humidity change

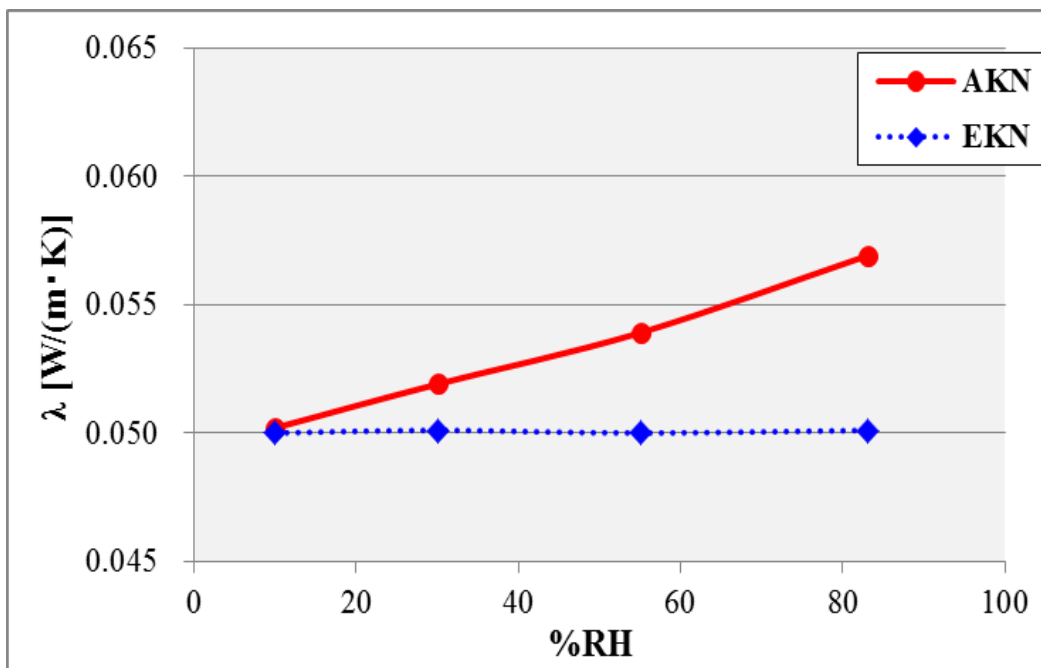


Fig. 2.8 Thermal conductivities of the AKN and EKN associated with relative humidity change

## 2. 3. 2 吸脱着熱量結果

### 2. 3. 2. 1 吸脱着熱の大きさ

相対湿度変化（青点線）に呼応する AF-H1 の吸脱着熱量変化（赤実線）を Fig.2.9 に示す。この AF-H1 の 1 は実験番号を表す（以下同様）。グラフの横軸は時間（h），左縦軸は熱流（mW），右縦軸は相対湿度（%RH）である。赤線のピーク①は、相対湿度を 10→50%RH へ変化させた時の吸着熱，ピーク②は 50→82%RH 時，ピーク③は 82→95%RH 時の吸着熱である。次に負のピーク④は 95→82%RH 時の脱着熱，負のピーク⑤は 82→50%RH 時，負のピーク⑥は 50→10%RH 時の脱着熱となる。Fig.2.10 は、相対湿度を 1→9→50→9→1%RH と変化させた時の AF-H3 の吸脱着熱を示す。

湿度計の精度上，10%RH 未満は露点計（緑点線）を，10%RH 以上では新栄テクノロジー製湿度計（青点線）を用いた。両湿度計間では，約 3%RH の誤差が生じる。要因の一つとして取付け位置の微妙な違いによるものと推定される。同様に Fig.2.11 は、相対湿度を 10→51→82→94→82→50→10%RH と変化させた時の AF-Na1 の吸脱着熱を示す。Fig.2.12 は、相対湿度を 1→12→48→82→96→1%RH と変化させた時の AF-Na2 の吸脱着熱である。Fig.2.10 同様に湿度計を使い分けて測定した。なお，測定条件を変えた他のチャートは，紙面の関係上省略する。また，露点計及び湿度計のプロットが何箇所か飛んだが，傾向は読取れると判断した。

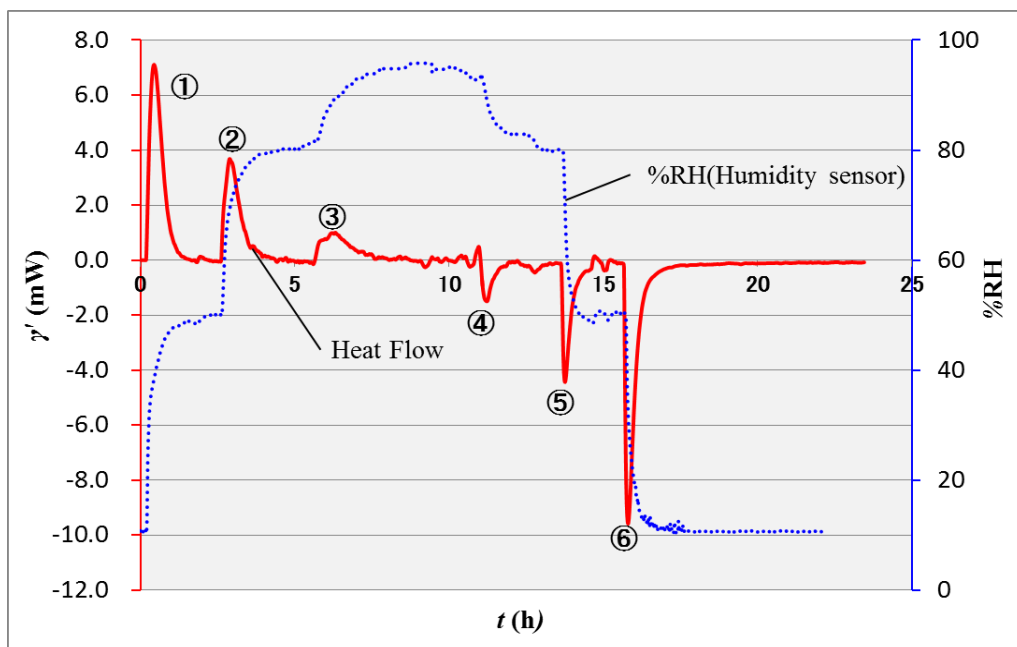


Fig.2.9 Adsorption/desorption heat in AF-H1 associated with the relative humidity change (10↔95% RH)

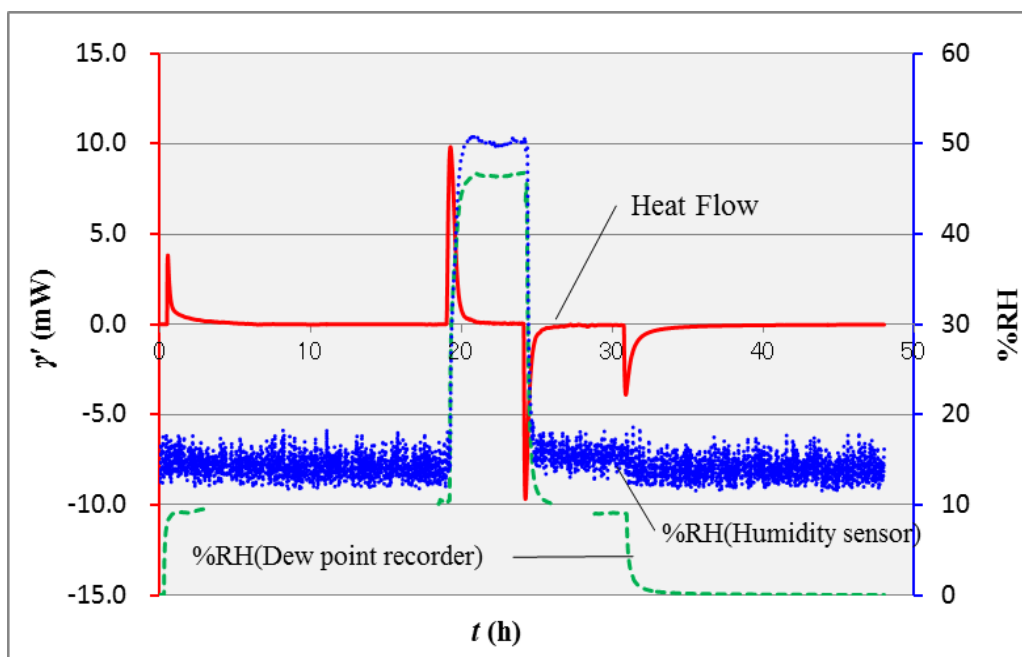


Fig.2.10 Adsorption/desorption heat in AF-H3 in the low humidity region (1↔50% RH)

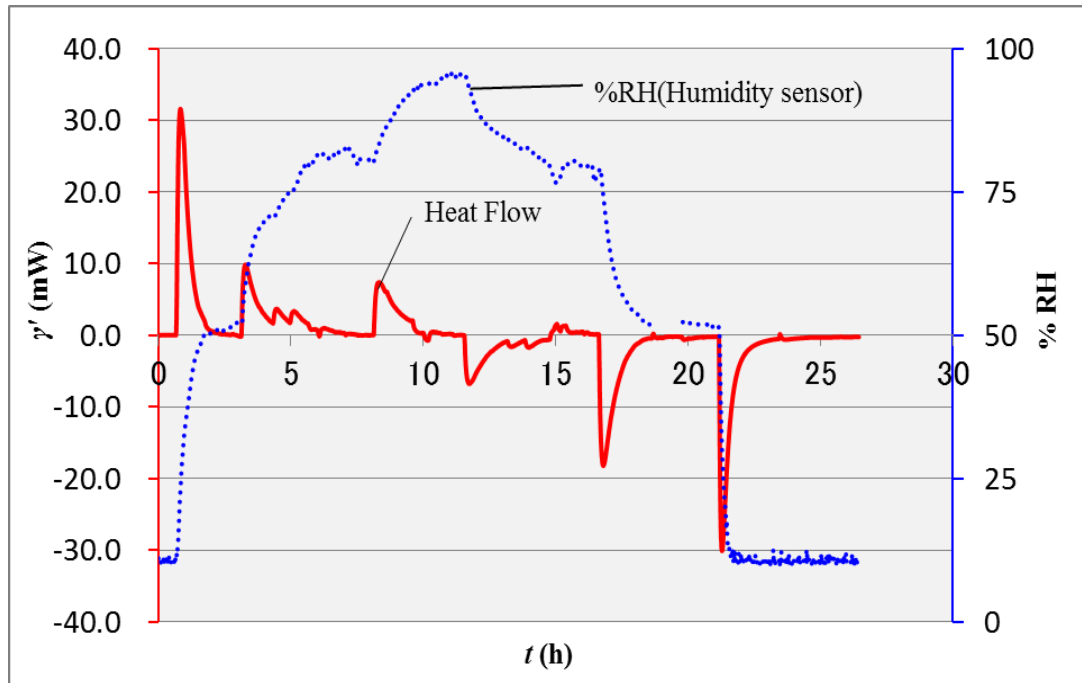


Fig.2.11 Adsorption/desorption heat in AF-Na1 associated with the relative humidity change (10↔94% RH)

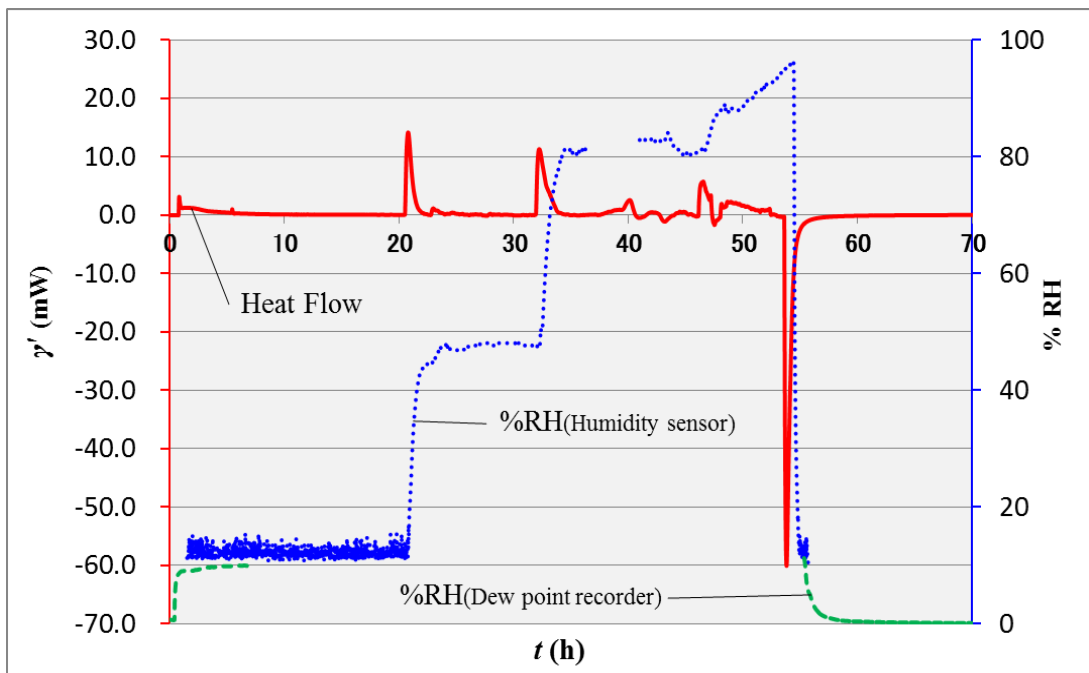








Fig.2.12 Adsorption/desorption heat in AF-Na2 associated with the relative humidity change (1↔96% RH)

Fig.2.9, Fig2.10, Fig2.11, Fig2.12 から導き出された吸脱着熱量及び省略した他の測定結果を Table2.5 にまとめた. なお, 相対湿度 10%RH を測定開始とした計測分 (Table2.5:AF-H1, AF-H2)は, AF-H3(Fig.2.10)の 10%RH 時の吸着熱[97.6J/g]を採用した.

一方, AF-Na1 の 10%RH 時の吸着熱は, AF-Na2(Fig.2.12)の 459.3J/g と AF-Na3 の 329.1J/g の平均吸着熱[394.2J/g]を採用した. 以上をまとめた AF-H1,2,3 と AF-Na1,2,3 の水分の吸脱着熱変化をそれぞれ Fig.2.13, Fig.2.14 に示した. 実線は相対湿度変化に呼応する吸着熱量, 点線は脱着熱量を示す. 両試料とも水分の吸脱着曲線 Fig.2.6 に酷似しているが, 10%RH 付近では吸着熱と脱着熱の間にヒステリシスが生じる.

また, Fig.2.12 の 85%RH 以上における AF-H1 と AF-H2 の吸着熱は, 約 20%の測定差が生じた. 高湿度付近では, 僅かな測定誤差や測定機器の精度が影響するようである. よって, 後述の官能基等の熱量計算では両者の平均値を採用することとした.

Table2.5 Relation between the relative humidity and the quantity of adsorption/desorption heat in AF-H and AF-Na (in J/g) (the values in brackets are estimates)

%RH	AF-H1 	AF-H2 	AF-H3 	AF-Na1 	AF-Na2 	AF-Na3 
0	[0]	[0]	0.0	[0]	0.0	0.0
10±1	[97.6]	[97.6]	97.6	[394.2]	459.3	329.1
50±3	363.6	—	384.8	1268.6	1191.1	1087.1
80±2	524.0	619.6	—	2036.1	2189.5	—
95±3	610.3	804.4	—	2563.0	2932.4	—
80±2	544.9	—	—	1995.3	—	—
50±2	426.1	—	384.8	1275.8	—	1087.1
10±2	122.2	213.8	174.2	706.2	—	682.2
1	—	—	-19.9	[413.5]	464.1	362.9

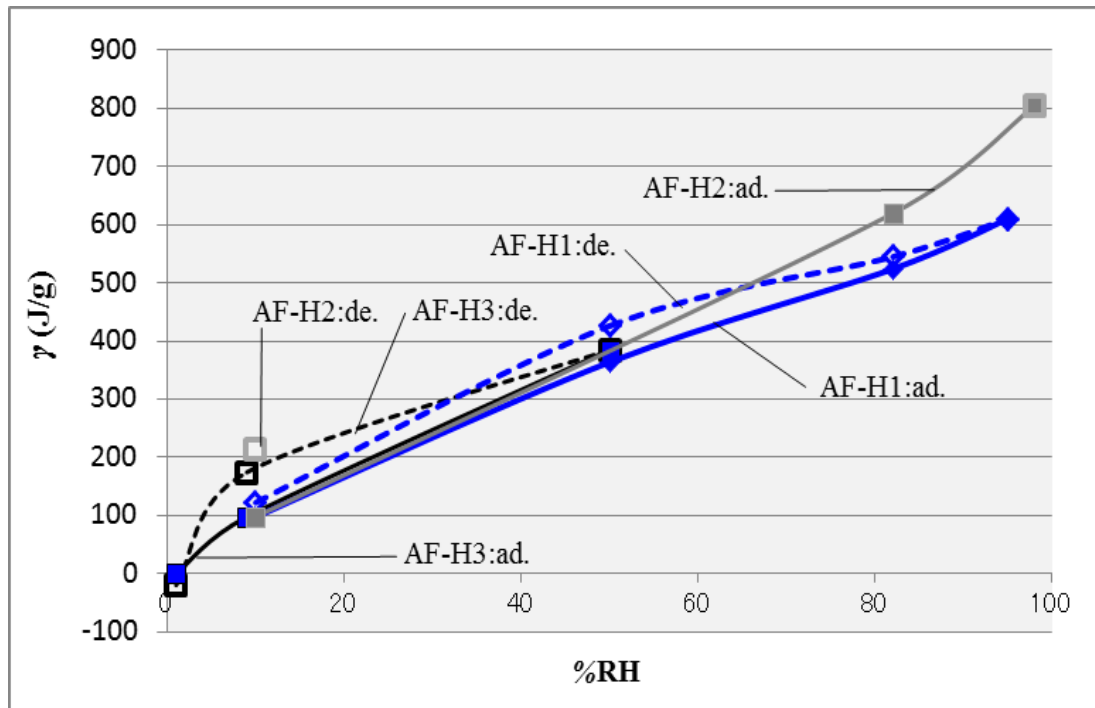


Fig.2.13 Quantities of adsorption/desorption heat in AF-H1,2,3 associated with the relative humidity change

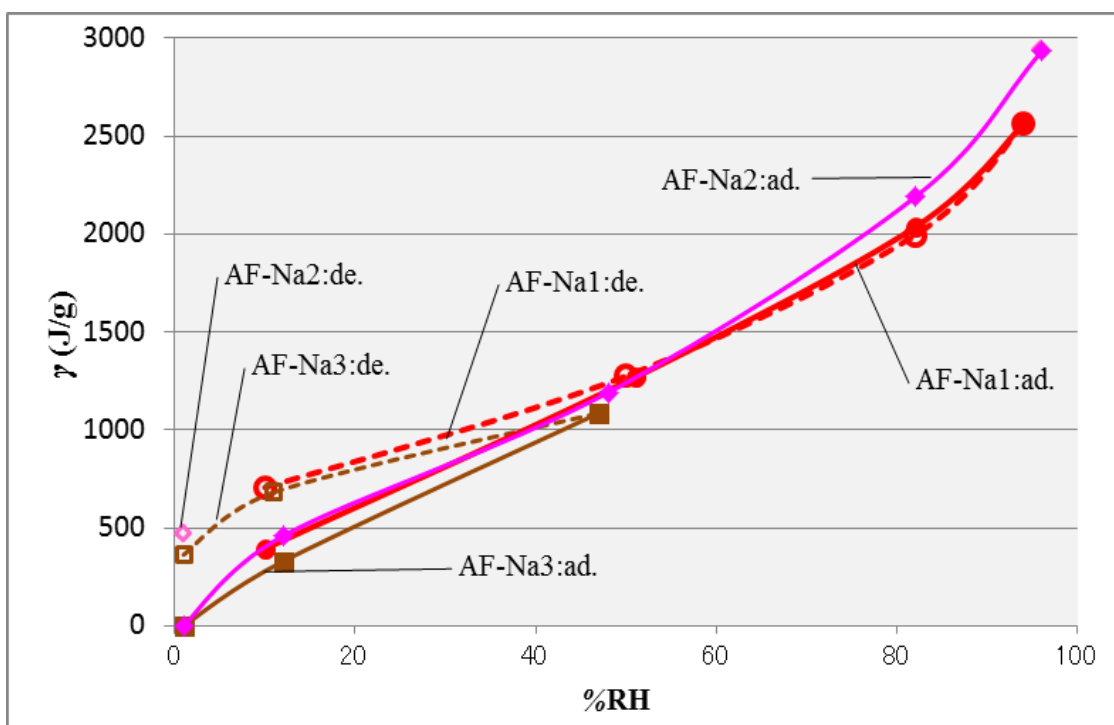


Fig.2.14 Quantities of adsorption/desorption heat in AF-Na1,2,3 associated with the relative humidity change



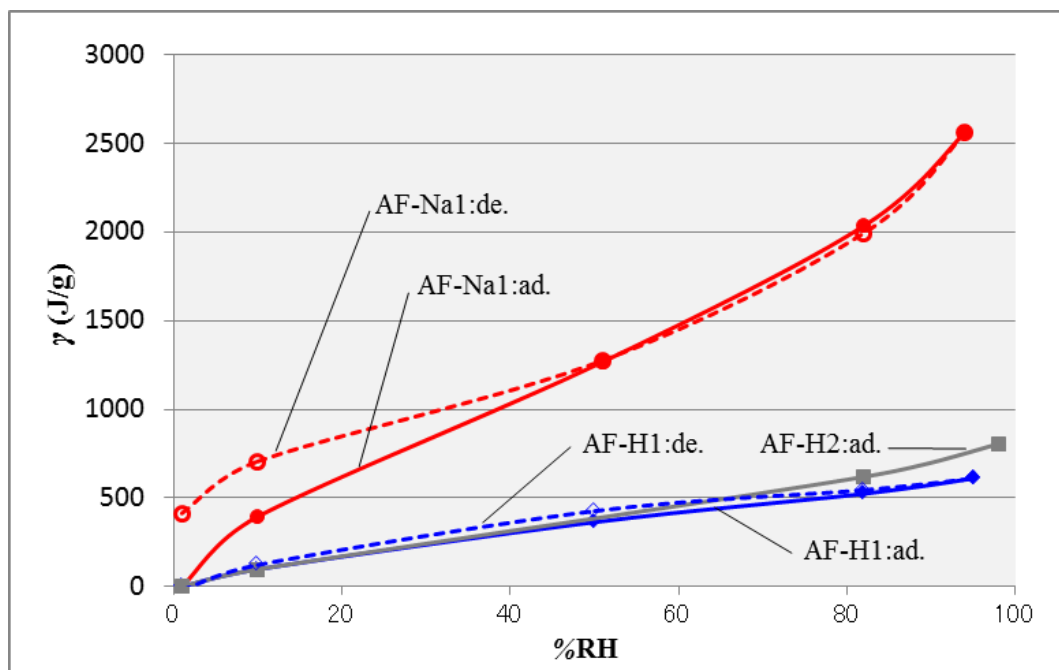


Fig.2.15 Comparison of the quantities of adsorption/desorption heat between AF-H and AF-Na

また、Fig.2.15は、AF-H1,2, AF-Na1の吸脱着熱量変化のスケール比較である（但しAF-H2は吸着のみ）。なお、AF-Na1の1%RH時の脱着熱は、AF-Na2の464.1J/gとAF-Na3の362.9J/gの平均脱着熱[413.5J/g]を採用した。

### 2. 3. 2. 2 水分の吸脱着に伴う官能基の吸脱着熱量

AF-Naは、側鎖のほぼ全ての官能基がCOONa基とCOOH基の2種の官能基から構成されている(Fig.2.1)。よって、COOH/COONaの構成比率から1mol当たりのCOONa基の水分と熱の吸脱着量を求めることができる。

他方、AF-Hは、側鎖のほぼ全てのCOONa基をCOOH基に置換させた構造を有する。よって、AF-Hに含まれる官能基数より、1mol当たりのCOOH基の水分と熱の吸脱着量を求めた。Table2.6は、水蒸気濃度変化に呼応する両官能基の水分と熱の吸脱着量を示す。COONa基の官能基当たりの吸脱着水分量は、COOH基の概ね3倍以上となる。また、吸脱着水分量は、両官能基とも高湿度側(80~95%RH)で大きくなる。

一方、COONa 基の吸脱着熱は、COOH 基の 3 倍程度になるが、脱着熱の低湿度側は、ヒステリシスの影響を受け比較は困難である。また、両官能基の吸脱着熱は、COOH 基は、低湿度側で大きく、COONa 基は、低湿度側と高湿度側で大きくなる傾向を示す。

Table2.6 Quantities of heat adsorption/desorption on the functional groups, associated with moisture adsorption/desorption

%RH	$W_f$ (g/mol)		$\gamma_f$ (KJ/mol)	
	COOH	COONa	COOH	COONa
0→10	3.96	15.25	15.6	72.6
10→50	12.36	38.13	44.1	159.0
50→80	8.20	42.27	31.5	141.0
80→95	12.76	33.51	17.3	97.6
95→80	-9.43	-31.64	-10.4	-106.9
80→50	-9.00	-41.94	-19.0	-134.4
50→10	-14.75	-37.02	-48.5	-99.5
10→1	-3.68	-15.39	-17.9	-52.6

### 2. 3. 2. 3 両官能基への水分の吸脱着熱

Table2.6 の 官能基当りの水分と熱の吸脱着量から両官能基への水分 1g 当りの吸着熱(吸着熱量/吸着水分量)を Fig.2.16 に示す。80→95%RH 時の COOH 基への吸着熱を除き、水分の凝縮熱(黒点線)よりも大きな値となっている。

また、両官能基間の差はそれほど大きくなく、全体的に相対湿度の増加に伴って、水分の吸着熱は減少する。同様に両官能基への水分 1g 当りの脱着熱(脱着熱量/脱着水分量)を Fig.2.17 に示す。COOH 基は、吸着熱と同傾向であるが、COONa 基の傾向は異なり、湿度変化の影響をほとんど受けていない。後述の考察で述べるが、要因の一つとして、脱着条件の絶乾室素挿入(10%RH→1%RH)時における仮想絶乾が、どれだけ吸着時の初期条件の絶乾に近づいたか不明であり、僅かな水分率の差が影響している可能性もある。

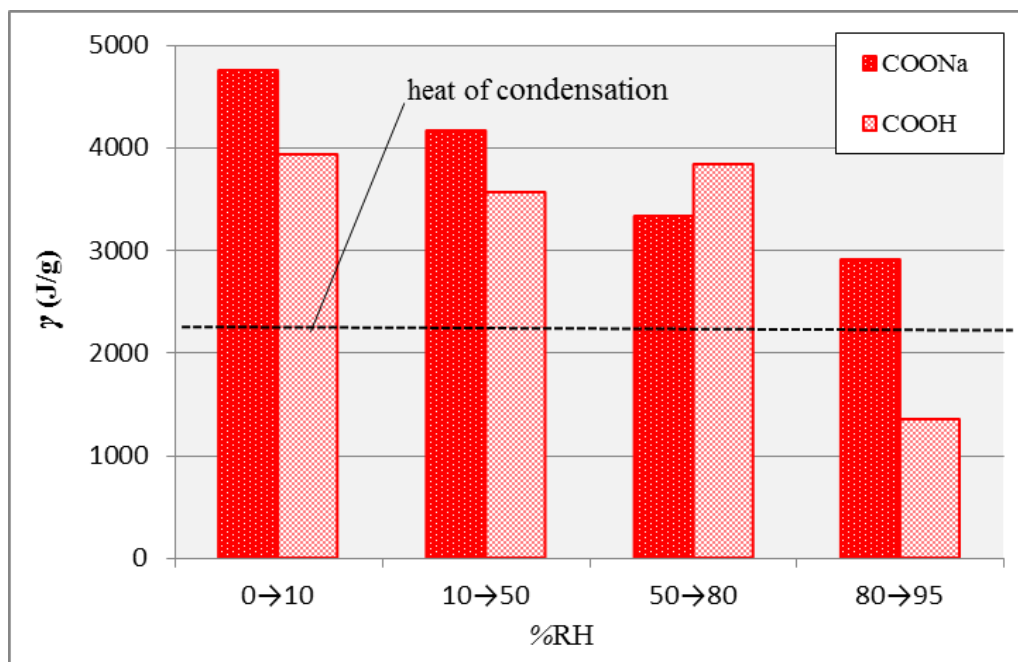


Fig. 2.16 Quantities of adsorption heat per gram of moisture associated with the relative humidity change

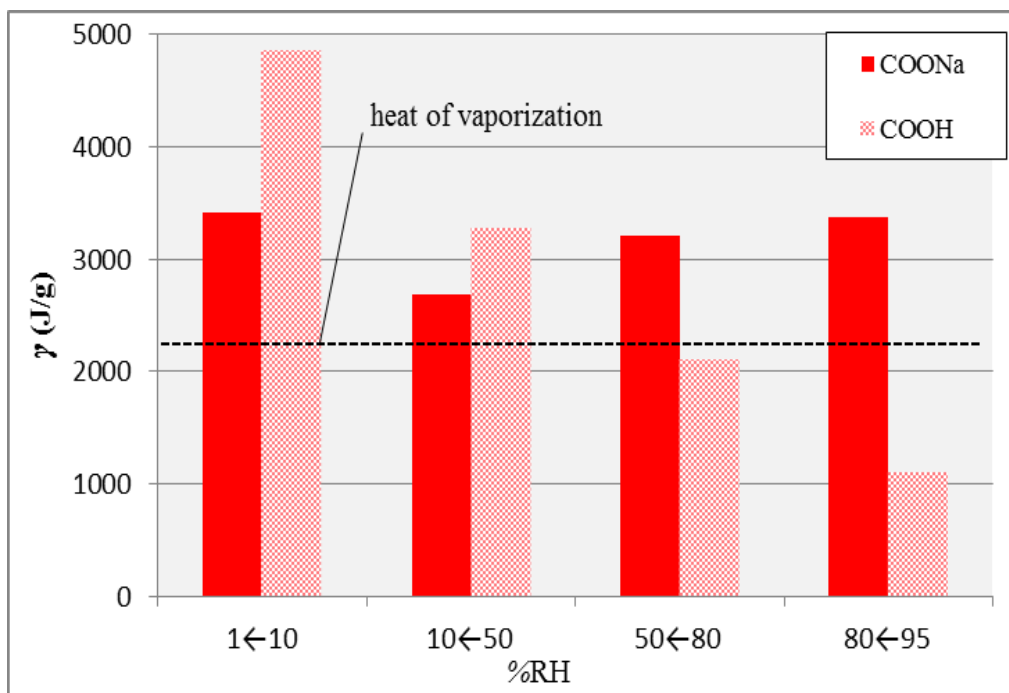


Fig.2.17 Quantities of desorption heat per gram of moisture associated with the relative humidity change

次に、Fig.2.18 は、各官能基への水分 1g 当りの吸着熱量を示す。各官能基への水分 1g 当りの吸着熱量は、図中の点線に示す水分の凝縮熱をはるかに上回り、COONa 基、COOH 基の吸着熱量は、約 3500~4000kJ/kg となり、水分の凝縮熱を差引いた値は約 1500kJ/kg となった。これらの熱量は、凝縮した水分子が官能基と水和する事によって、もたらされたエネルギーと考えられる。一例として、COONa 基に大量の水分子が水和した状態を Fig.2.19 に示す。また、この水和エネルギーを水分 1mol に換算した結果を Fig.2.20 に示した。

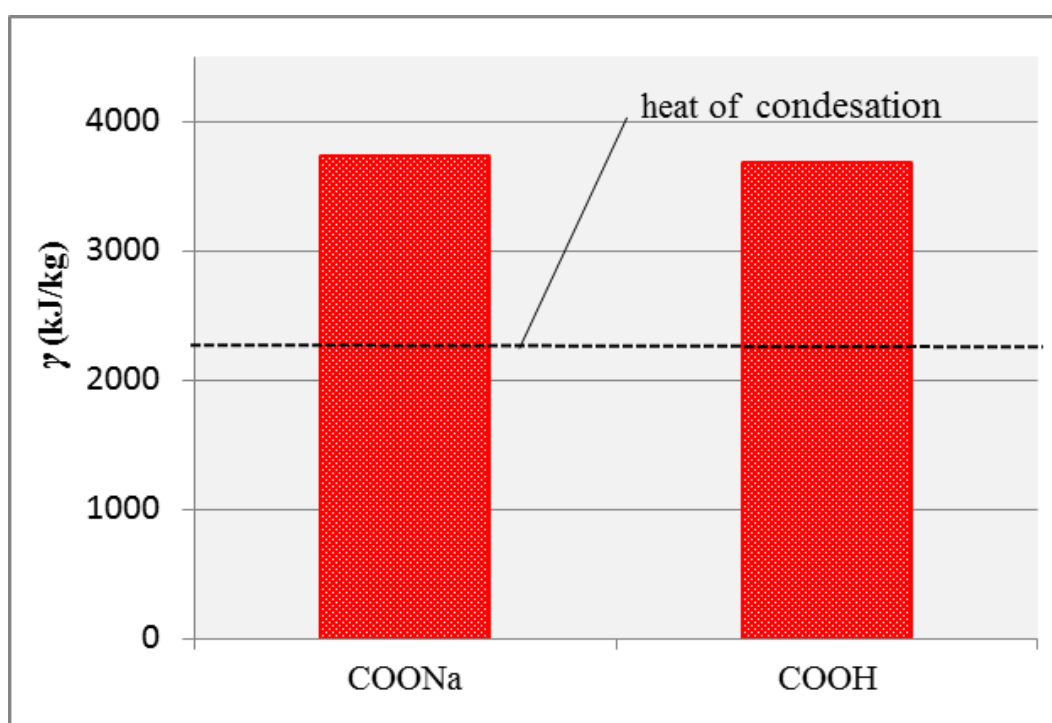


Fig.2.18 Quantities of adsorption heat on the functional groups per gram of moisture (when the relative humidity changed from 10 to 80% RH)

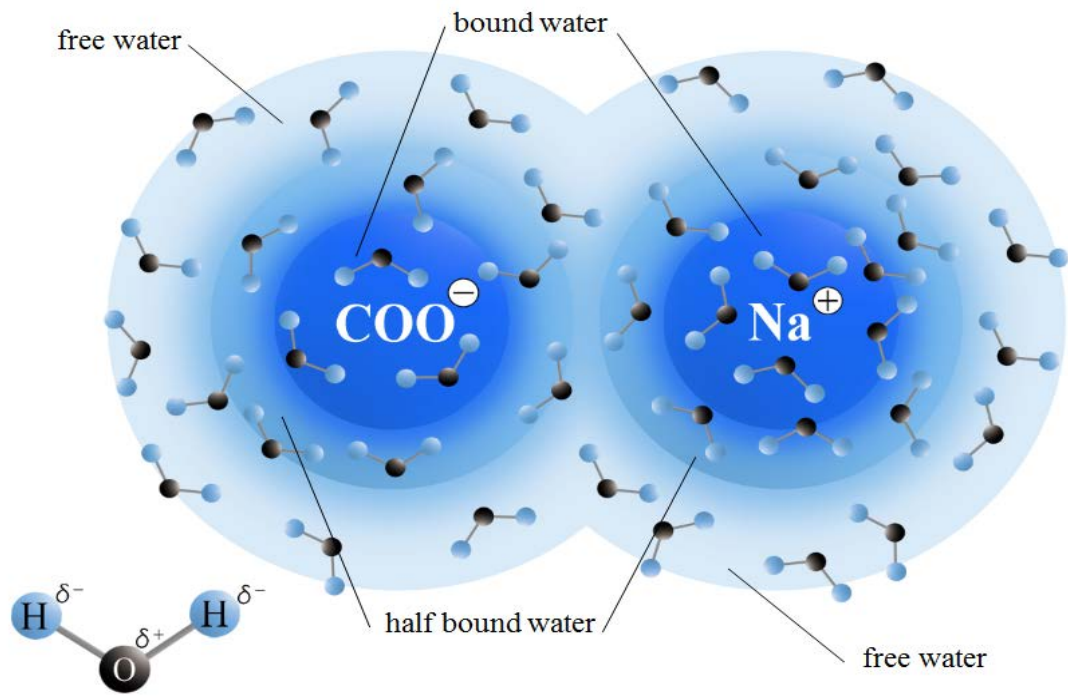


Fig.2-19 Schematic representation of a hydration on the functional group

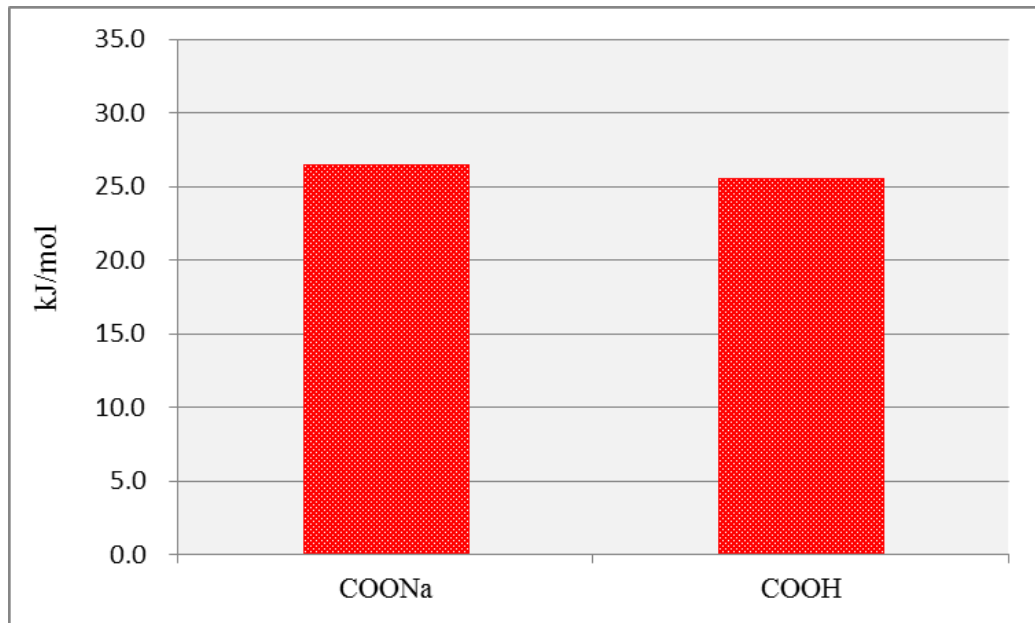


Fig.2.20 Hydrogen bond-derived energies concerning the functional groups

## 2. 4 考 察

吸放湿性を有する不織布 ANW とニット AKN の熱伝導率は、相対湿度の増加に呼応し、増加傾向にあるが、吸放湿を有さない不織布 ENW とニット EKN の熱伝導率は、ほとんど変化しない。このことから、前者は、水分吸着による保温性の低下が生じ、後者は、水分吸着が無く、保温性への影響を受けないことが示された。

次に、筆者らは、各繊維素材への水分吸着による吸着熱は、水蒸気が液相へ相転移する凝縮熱に等しいと考えていた。しかし、今回の実験結果 Fig.2.16 から、各官能基へ吸着する水分の吸着熱は、次式のようにになると仮定した。

吸着熱  $H$  は、

$$H \doteq H_c + H_y$$

ここで、 $H_c$  は水分の凝縮熱、 $H_y$  は水和エネルギーを表す。

つまり、 $H$  は、水分の凝縮熱  $H_c$  と凝縮した水分子が官能基と水和する水和エネルギー  $H_s$  の総和になると考えられる。各官能基に対する水和エネルギーは、Fig.2.20 より約 25kJ/mol となり、水和エネルギーは水素結合が主体であると推察される。これらの値は、文献[15]から鑑みても妥当な値であろう。

次に、AF·Na の水分の吸着熱は、Fig.2.16 より、相対湿度の低い領域の方が、高い領域よりも大きくなる傾向にあり、凝縮熱を差し引いた水和エネルギーの水和状態は、[結合水]⇒[半結合水]⇒[自由水]と変化し、Fig.2.19 に示すように、官能基の周りに放射状に膨れ上がり、水分子の増加に伴い結合力が低下する傾向にある。

以上の結果より、吸放湿繊維材料の吸着熱は、官能基の周りに水和する水分子の量と水和エネルギー（今回は水素結合力）の大きさに左右されると考えられる。

しかし、水分子の吸着に伴う膨潤によって、繊維間の熱伝導率は高まり[16,17]、吸着熱による保温効果は相殺されることになる。よって、吸湿発熱による保温性の向上を

計る分子構造は，各種官能基と水和する水分子の結合充填率の向上が望ましく，架橋密度や架橋伸度を制御し，水和による膨潤度の抑制も併せて重要となる．よって，エントロピーの影響を加えた検討も必要となろう．

## 第3章 吸放湿繊維材料の水蒸気及び熱移動に関する実験的研究

### 3.1 はじめに

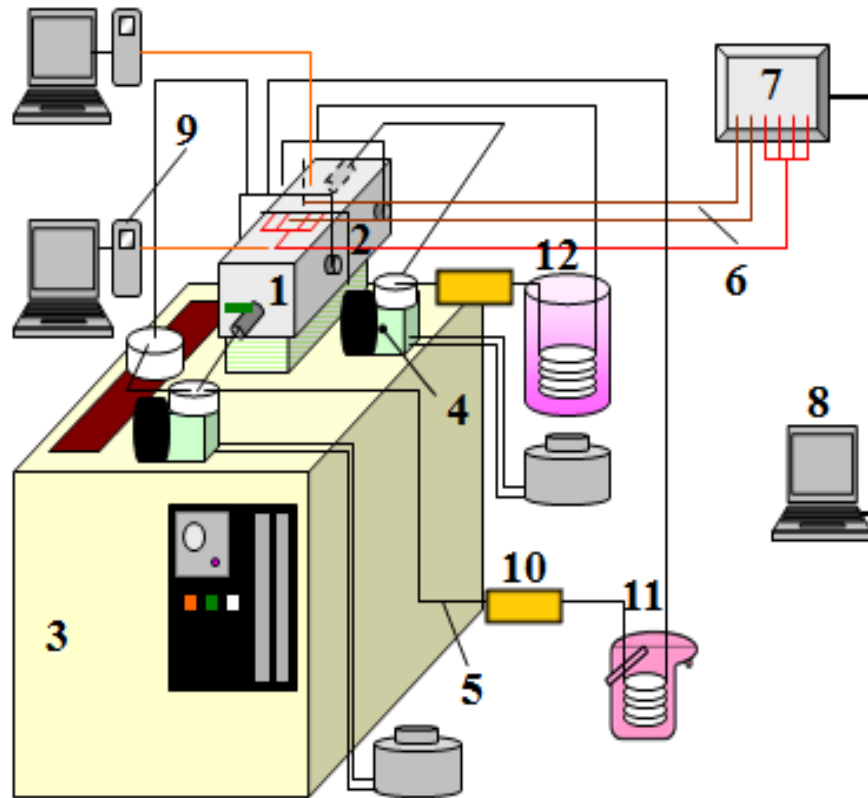
親水性繊維の中でも最も吸放湿能力の高い塩型ポリアクリル酸系繊維(Salt of Polyacrylic Acid- Fiber)と吸放湿性を有さないポリエステル繊維(Polyester- Fiber)を比較し、非定常から定常的状态における水分および熱挙動について実験的研究を進めた。また、別途、相対湿度変化に呼応する熱伝導率を元に、水分の吸脱着を有する繊維の「見かけの熱伝導率( $\lambda_{app}$ )」を試算した。これらの結果から、吸脱着熱が両試料の保温性にいかなる影響を与えるかを考察し、衣服の保温性へ与える大きさを試算した。

### 3.2 水蒸気の拡散と熱移動を制御できる実験装置の作製

実験装置の概略図を Fig. 3.1 に示す。温度と水蒸気量を制御する温湿度発生装置 3 (神栄株式会社) から chamber 1 へ調温調湿エアを送り込む。特に、今回は充填層 10 で乾燥空気 (5%RH 以下) とし、かつ冷水槽 12 で可能な限り低温とした。

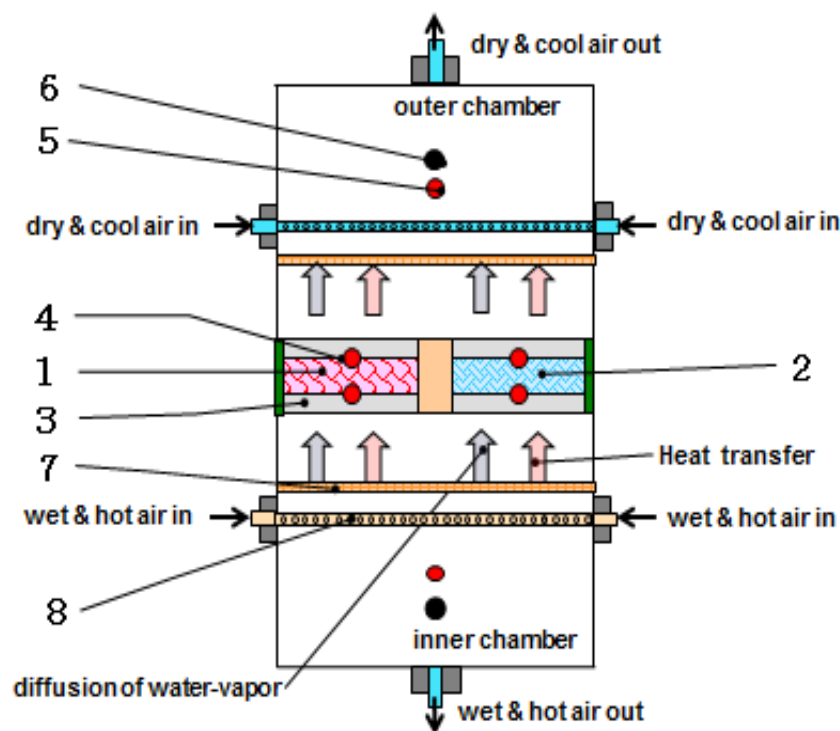
chamber は、Fig. 3.2 に表したように、一辺 100mm 四方の inner chamber と outer chamber の二つの空間に仕切られており、inner chamber は衣服内環境を想定し「温暖多湿空気 (wet & hot air)」、outer chamber は衣服外環境を想定し「低温乾燥空気 (dry & cool air)」が、それぞれ個々に送入される。この両 chamber の接合部 (仕切り面) へ試料 1, 2 を取付け、その表裏にそれぞれ熱電対 4 を取付けた。





1. Experimental chamber, 2. Test samples, 3. Accurate humidity generator, 4. Air pump, 5. Polyurethane hose, 6. Thermo-couples, 7. Data acquisition unit, 8. Personal computer, 9. Humidity meter, 10. Desiccant, 11. Heating-coil & hot water bath, 12. Cooling-coil & cool water bath.

Fig.3.1 Schematic diagram of experimental apparatus



1. Test sample (ANW or AKN), 2. Test sample (ENW or EKN), 3. Support sheet, 4. Thermocouples for measuring inside and outside of sample, 5. Thermocouples for measuring inside/outside of test chamber, 6. Humidity meter for measuring inside/outside of the test chamber, 7. Mesh screen for preventing ventilation, 8. Duct with many holes for spraying air along the screen.

Fig. 3.2 Sketch of chamber

### 3. 3 吸放湿繊維材料と吸放湿を有さない繊維材料の表裏温度変化の測定

#### 3. 3. 1 実験条件 I (不織布), 文献[5,6]

実験条件 I は、不織布を用いる実験である。水分の影響のないドライヒートロス（以後 DHL と称する）と水分の影響を有するウェットヒートロス（以後 WHL と称する）の大きく二つの条件がある。DHL①は、inner chamber へ「dry & hot air」、outer chamber へ「dry & cool air」を送入する。次に、WHL①は、inner chamber へ「wet & hot air」、outer

chamber へ Fig.3.2 の 12 及び 10 を使わない，室内環境に準拠した「normal air」を送入する．更に，WHL②は，Fig.3.2 の 12 及び 10 を使用し，outer chamber へ乾燥空気を送る条件である．以上の条件を Table3.1 に示す．

Table 3.1 Temperature and relative humidity condition in each (inner/outer) chamber

<b>condition</b>	<b>chamber</b>	<b><math>T(^{\circ}\text{C})</math></b>	<b>% RH</b>
<b>DHL①</b>	<b>inner</b>	<b>27.5</b>	<b>&lt;10</b>
	<b>outer</b>	<b>22.5</b>	<b>&lt;10</b>
<b>WHL①</b>	<b>inner</b>	<b>27.5</b>	<b>75</b>
	<b>outer</b>	<b>22.5</b>	<b>25</b>
<b>WHL②</b>	<b>inner</b>	<b>29.0</b>	<b>65</b>
	<b>outer</b>	<b>21.5</b>	<b>15</b>

### 3. 3. 2 実験条件Ⅱ（ニット），文献[7]

実験条件Ⅱは，ニットを使用する実験である．

ドライヒートロス②（以後 DHL②と称する）及び inner chamber へ「wet & hot air」を outer chamber へ乾燥空気を送るウエットヒートロス③（以後 WHL③と称する）の条件を Table3.2 に示す．

Table 3.2 Temperature and relative humidity condition in each (inner/outer) chamber

<b>condition</b>	<b>chamber</b>	<b><math>T(^{\circ}\text{C})</math></b>	<b>% RH</b>
<b>DHL②</b>	<b>inner</b>	<b>24.5</b>	<b>&lt;10</b>
	<b>outer</b>	<b>18.5</b>	<b>&lt;10</b>
<b>WHL③</b>	<b>inner</b>	<b>30.5</b>	<b>65</b>
	<b>outer</b>	<b>29.0</b>	<b>20</b>

### 3. 4 結果

#### 3. 4. 1 実験条件 I (不織布) の実験結果

実験条件 I の不織布を使用した DHL①の条件 (Table 3.1) で, 約 3 時間測定を行った結果を Fig. 3.3 に示す. 実線は, inner chamber 側, 点線は outer chamber 側の試料面温度を示す.

ANW 及び ENW の温度挙動は表裏ともほぼ同じであり, Fig. 3.4 より, 両試料の表裏温度差は等しい傾向を示す. 「 $\Delta T_c=T_{ai}-T_{ao}$ 」は, chamber 間の温度差, 「 $ai$ 」は *air in*, 「 $ao$ 」は *air out* である. 「 $\Delta T_s=T_1(ANW)-T_2(ANW)$ 」, 「 $\Delta T_s=T_1(ENW)-T_2(ENW)$ 」は, 各試料表裏の温度差を示し,  $T_1$  は, 「 $ai$ 」側の試料表面温度を,  $T_2$  は, 「 $ao$ 」側の試料表面温度を表す. 以上の結果と Fig. 2.7 の相対湿度が低い領域の ANW と ENW の熱伝導率 (約 5% 内で同等) から, 両試料の熱流束もほぼ等しく, 熱流の一次元性が実現していると考えられる.

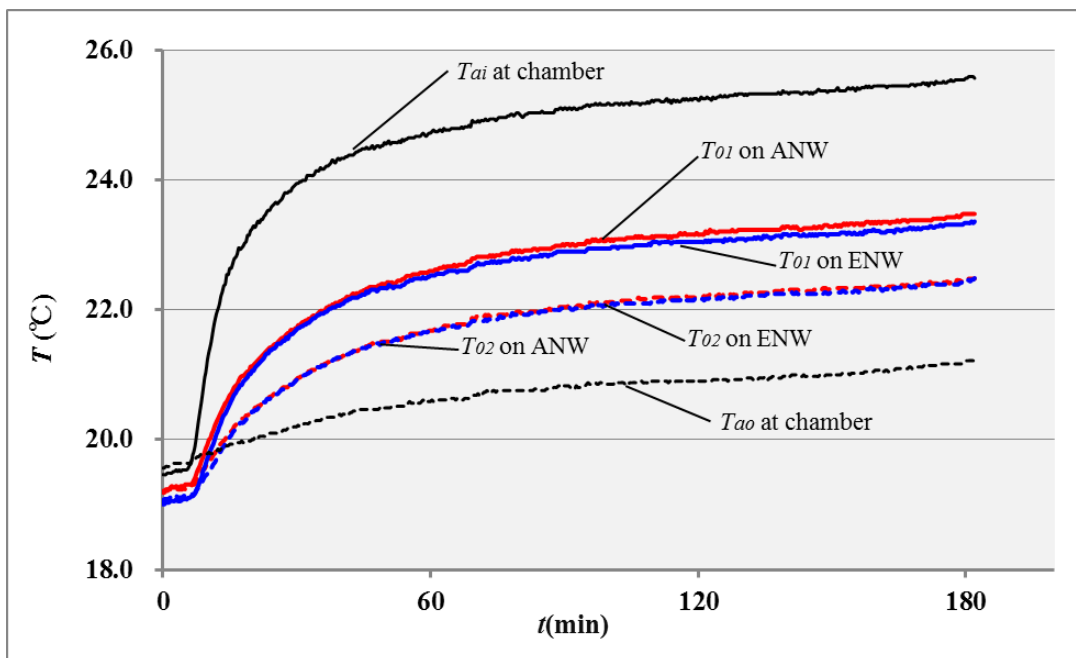


Fig.3.3 Temperature changes of surface//backside of each samples and inner/outer of chambers(DHL①)

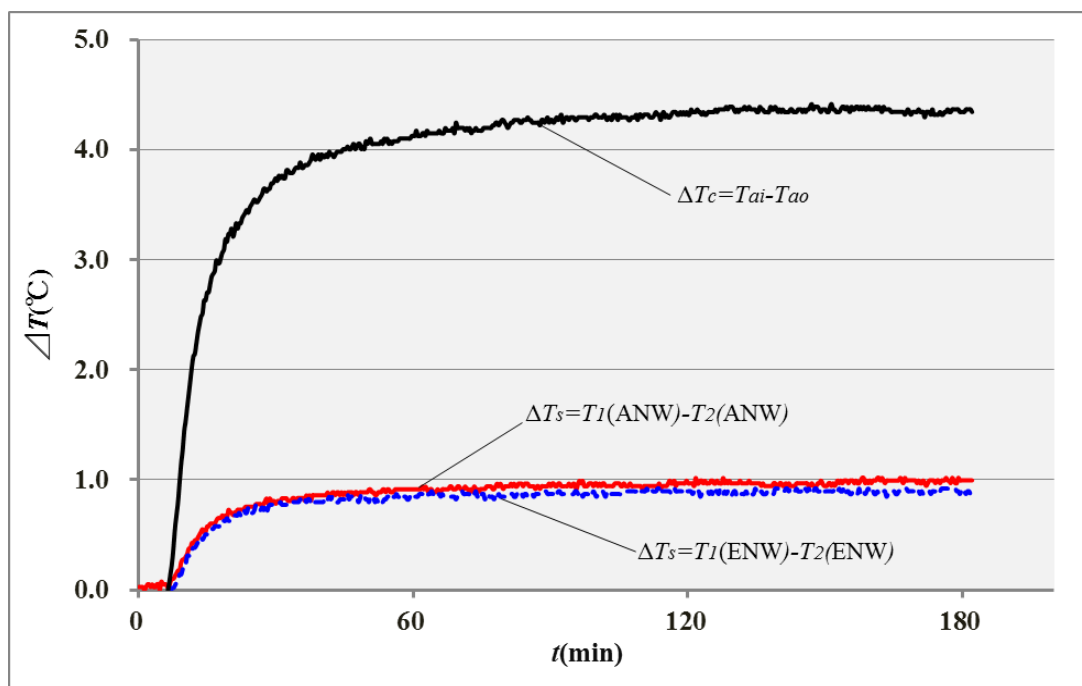


Fig. 3.4 Temperature differences of surface/backside of each samples and inner/outer of chambers (DHL①)

次に、Table 3.1 の WHL①の条件下で行った実験結果を Fig. 3.5 に示す。図から水分吸着による吸着熱によって、ANW の表裏温度は、約 3~4 °C 上昇し、その後 chamber 内条件に沿って低下するが、inner chamber 側の両試料の温度は、ANW の方が ENW より高く、また outer chamber 側の比較では、ANW の方が ENW より低くなる傾向にある。

Fig. 3.6 に両試料の表裏温度差の推移を示す。約 60 分経過後の定常状態において、ANW の表裏の温度差は約 1.5~1.7°C、ENW の表裏の温度差は約 1.0°C となり、その差は約 0.5~0.7°C である。同様に、Table 3.2 の WHL②の条件下で行った実験結果を Fig. 3.7 に、両試料の表裏温度差の推移を Fig. 3.8 に示す。約 60 分経過後の定常状態において、ANW の表裏の温度差は約 2.0°C、ENW の表裏の温度差は約 1.2°C となり、その差は約 0.8°C となった。Fig. 2.7 では、相対湿度の上昇に比例し、熱伝導率が高くなる傾向にあるが、WHL 条件下では、ANW の熱伝導率は、小さくなる傾向が示された。

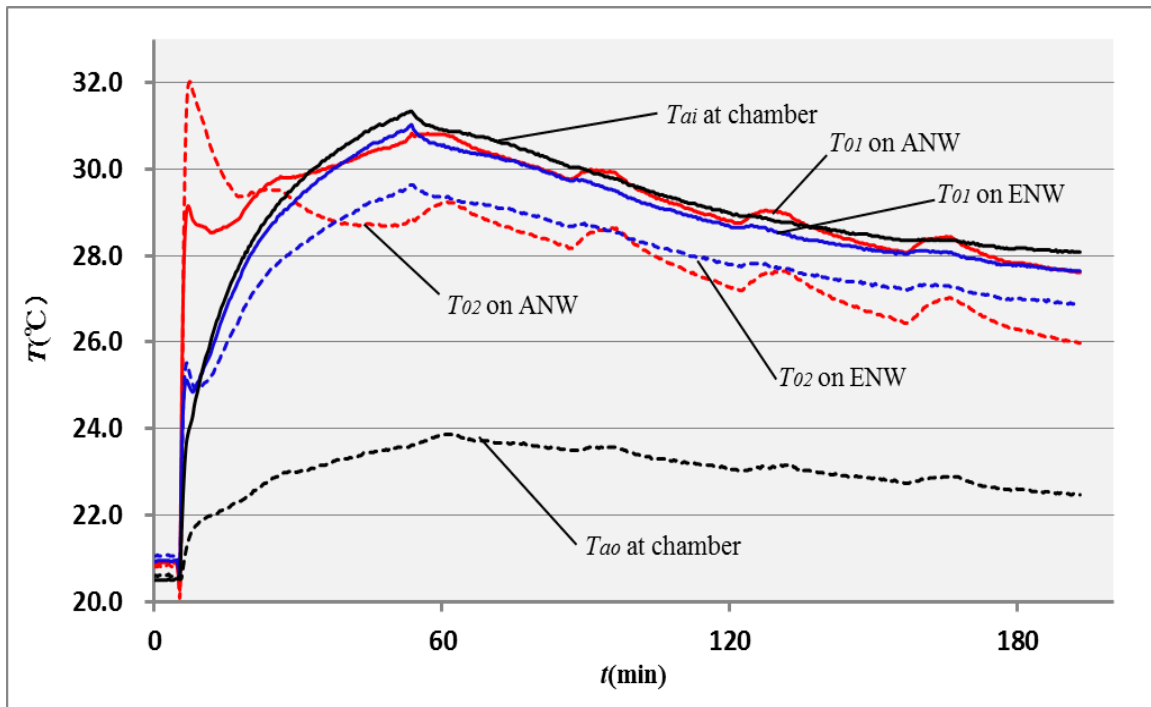


Fig. 3.5 Temperature changes of surface/backside of each samples and inner/outer of chambers from the unsteady state region to the steady state region(WHL①)

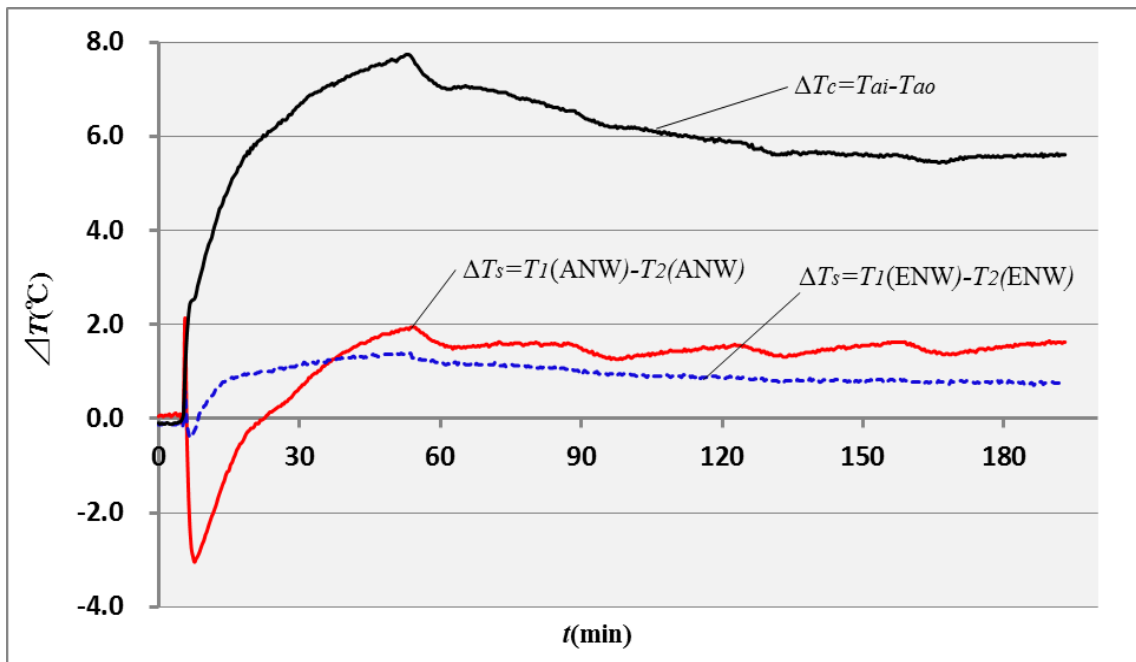


Fig.3.6 Temperature differences of surface/backside of each samples and inner/outer of chambers from the unsteady state region to the steady state region(WHL①)

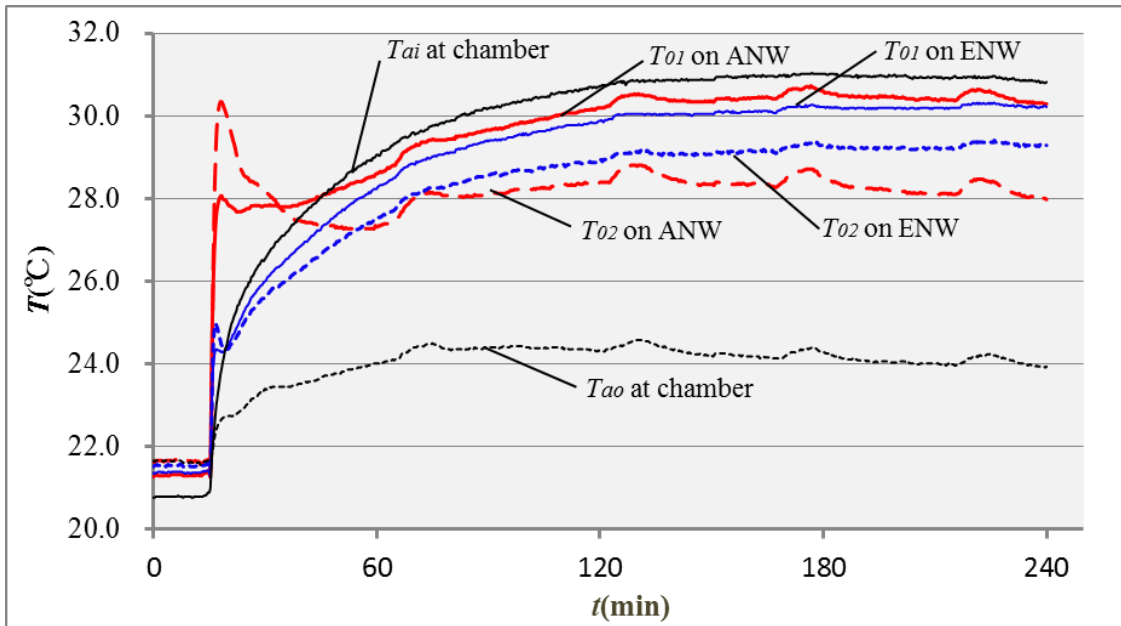


Fig. 3.7 Temperature changes of surface/backside of each samples and inner/outer of chambers from the unsteady state region to the steady state region(WHL②)

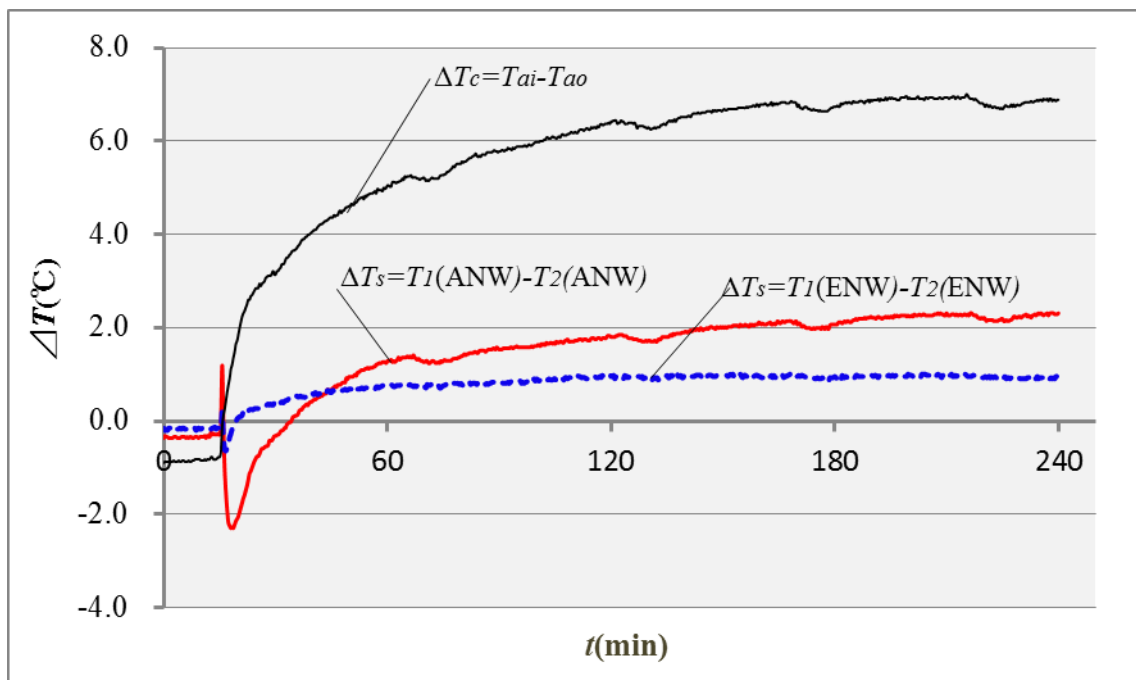


Fig. 3.8 Temperature differences of surface/backside of each samples and inner/outer of chambers from the unsteady state region to the steady state region(WHL②)

### 3. 4. 2 実験条件Ⅱ（ニット）の実験結果

ニットを使用した実験[7]は、不織布の実験結果[5,6]を参考に、定常的状态下の昇温効果を実験結果を明確化する為、各試料を二枚重ねにした。実験条件Ⅱの Table 3.2 に示す DHL②の実験結果を Fig. 3.9 に、両試料の表裏温度差を Fig. 3.10 に示した。これらの結果と Fig. 2.8 の相対湿度の低い領域の AKN と EKN の熱伝導率から、両試料の熱流束もほぼ等しく、不織布同様、熱流の一次元性が実現していると思なすことができる。次に、Table 3.2 に示す WHL③の条件結果を Fig.3.11 に示す。水分吸着による吸着熱によって、AKN の表裏温度は、約 3 °C 上昇し、その後 chamber 内条件に沿って緩やかに推移する。60 分経過後の定常的状态における inner chamber 側の試料温度は、AKN の方が EKN より高く、また outer chamber 側の比較では AKN の方が EKN より低くなる傾向が示された。

Fig. 3.12 から、定常的状态下の AKN の表裏の温度差は約 0.6~0.8 °C、EKN の表裏の温度差は約 0.3 °C であり、その差は約 0.4 °C である。Fig. 2.8 では、相対湿度の上昇に比例し、熱伝導率は高くなる傾向にあるが、WHL 下での AKN は、熱伝導率が小さくなる傾向にあり、実験条件Ⅰの不織布と同様であった。



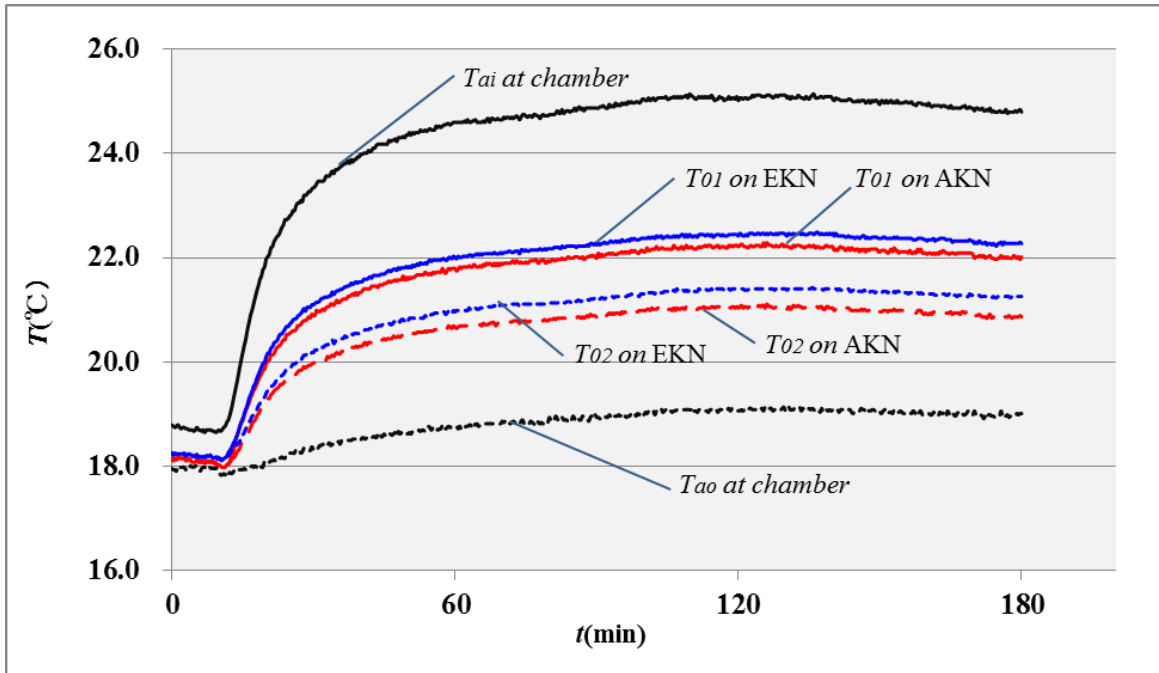


Fig.3.9 Temperature changes of surface//backside of each samples and inner/outer of chambers(DHL②)

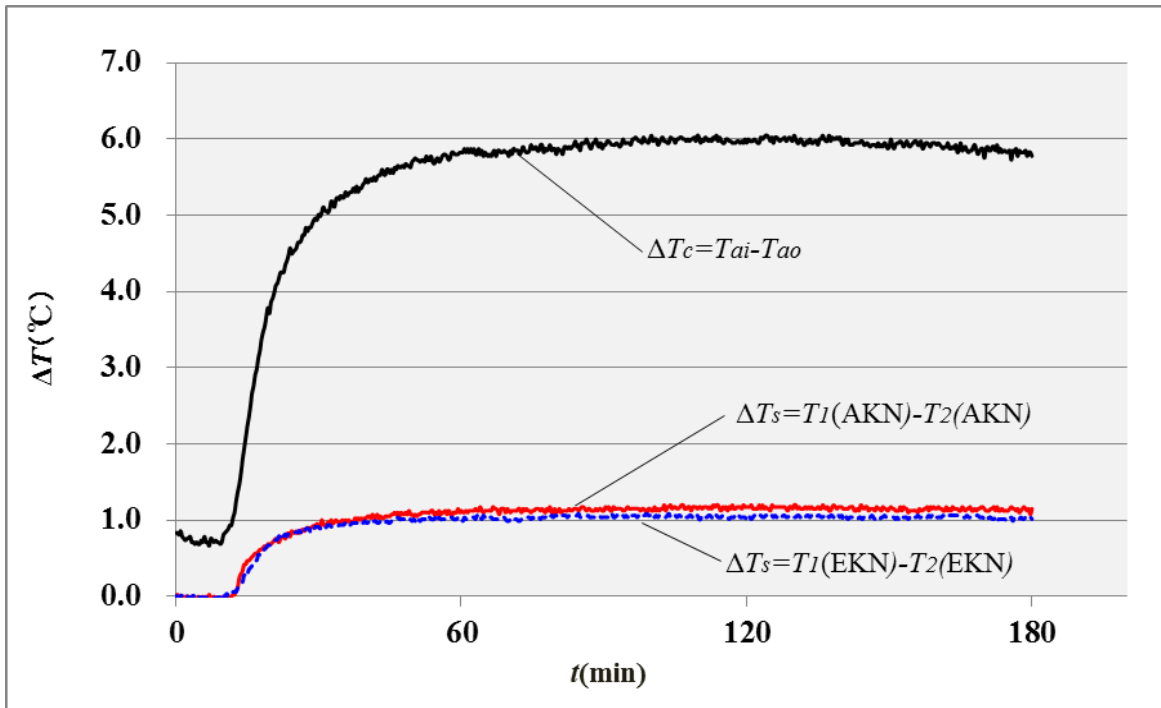


Fig.3.10 Temperature differences of surface/backside of each samples and inner/outer of chambers(DHL②)

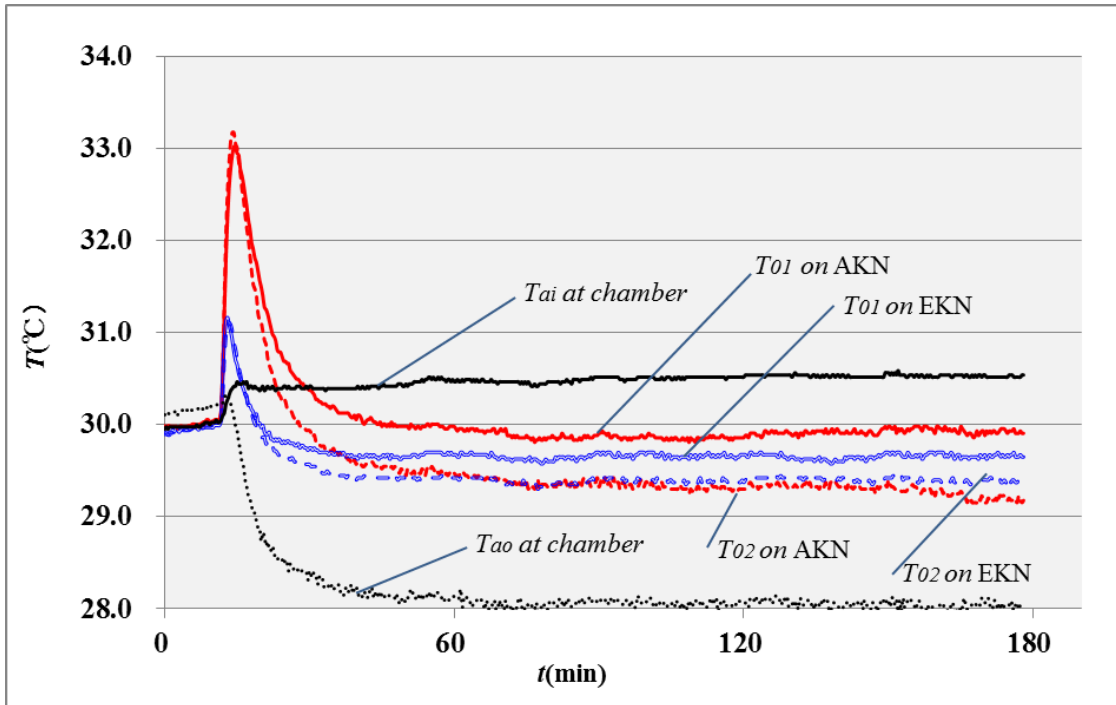


Fig. 3.11 Temperature changes of surface/backside of each samples and inner/outer of chambers from the unsteady state region to the steady state region(WHL③)

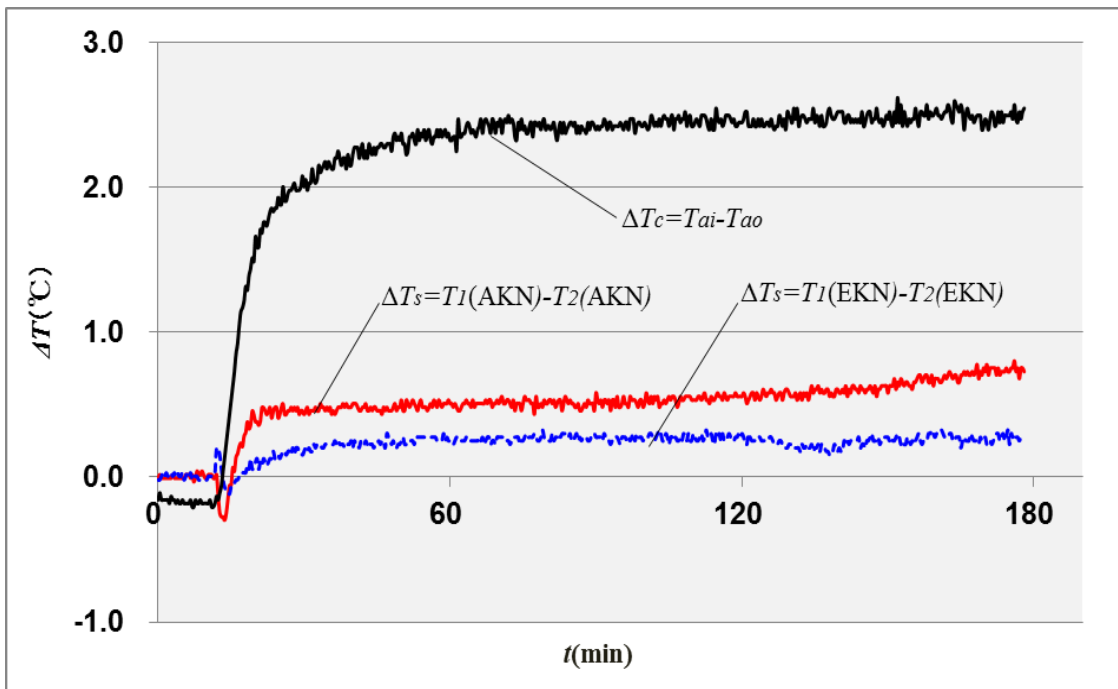


Fig. 3.12 Temperature differences of surface/backside of each samples and inner/outer of chambers from the unsteady state region to the steady state region(WHL③)

### 3. 5 見かけの熱伝導率 $\lambda_{app}$ による保温性の評価, 文献[6]

WHL 時の衣服の保温性の大きさを示すために, 両試料の表裏温度差から「見かけの熱伝導  $\lambda_{app}$ 」を見積ることとした. DHL 時の不織布 ANW と ENW 及びニット AKN と EKN それぞれの表裏温度差は, Fig.3.4, Fig.3.10 からほぼ同程度である. 一方, Fig.2.7, Fig.2.8 の相対湿度の低い領域の熱伝導率は, 約 5% 内で等しく, その結果, 熱流束  $q_w$  も次式 (3-1) により同程度となる.

次に, WHL 条件下の定常状態における不織布及びニットの表裏温度差から「見かけの熱伝導率  $\lambda_{app}$ 」を見積もった. その結果を Table 3.3 に示す.

DHL 時の熱流速  $q_w$  [ $W / m^2$ ] は

$$q_w = \lambda \Delta T_1 / d \dots \dots \dots (3-1)$$

WHL 時の水蒸気拡散の一元性が実現していると仮定し

$$\lambda_{app} = q_w d / \Delta T_2 \dots \dots \dots (3-2)$$

ここで,  $\lambda$ : 熱伝導率平均  $W/(m \cdot K)$

$\Delta T_1$ : DHL 時の試料の表裏温度差 (K)

$\Delta T_2$ : WHL 時の試料の表裏温度差 (K)

$d$ : 試料の厚み (m)

$\lambda_{app}$ : 見かけの熱伝導率  $W/(m \cdot K)$

以上から, WHL①, WHL②条件下の ANW の見かけの熱伝導率  $\lambda_{app}$  は, それぞれ  $0.0293 W/(m \cdot K)$ ,  $0.0244 W/(m \cdot K)$  となり, 実測値 (Fig. 2.7) と比較すると約  $3/5 \sim 1/2$  となる. 一般的に吸湿性を有する繊維の熱伝導性は, 相対湿度の増加に比例し, 大きくなる傾向にあるが [16,21], 今回の結果は異なった.

次に, ニットの場合も同様に, 見かけの熱伝導率  $\lambda_{app}$  を求めた. WHL③条件下の AKN の  $\lambda_{app}$  は,  $0.0269 W/(m \cdot K)$  となり, 実測値 (Fig. 2.8) と比較すると, その値は約  $1/2$  と

なった。

以上から、WHL 条件下の定常的状态における ANW 及び AKN の「見かけの熱伝導率  $\lambda_{app}$ 」の大きさは、何らかのメカニズムの働きによって、引き下げられる傾向が示された。

Table 3.3 Apparent thermal conductivity  $\lambda_{app}$  of ANW and AKN

Test sample	Condition	Apparent conductivity $\lambda_{app}$ [W/m·K]	Measured conductivity $\lambda$ [W/m·K]
ENW			0.0481
ANW	WHL①	0.0293	0.0447~0.0505
	WHL②	0.0244	
EKN			0.0501
AKN	WHL③	0.0269	0.0502~0.0569

### 3. 6 考察

吸放湿を有する繊維は、何らかのメカニズムの働きによって、「見かけの熱伝導率  $\lambda_{app}$ 」の大きさが、引き下げられていると考えられる。この作用は、水蒸気の吸脱着に伴う吸着熱の働きが、初期の一過性の現象でなく、連続的に引き起こされている可能性を示唆するものである。よって、吸放湿性に優れる素材を介し、温度差と湿度差の高低差のある環境下では、吸放湿を有する繊維の方が、保温性の向上が期待できる。

これは、冬場の衣服環境下において、有益な可能性を示唆するものである。

しかし、これらの現象をより正確に検証する為には、試料表裏の温度分布を点接触の熱電対だけでなく、試料面全体をサーモグラフィーで長時間可視化し、経時的温度分布の変化を計測する事が望ましい。また、衣服設計の観点から、試料の経時的温度変化に最も影響を与える環境条件を明確化することも重要である。

更に、WHL 時の温度上昇のメカニズムについて、妥当な数値解析モデルを設定し、水

蒸気の吸脱着に伴う発熱及び放熱を考慮した一次元非定常熱伝導及び水蒸気拡散の数値解析を行い，非定常から定常的状态に至る，温度差を維持する根拠を併せて明確化していく予定である。

## 第4章 吸放湿繊維材料の水蒸気及び熱移動に関する数値解析

### 4.1 まえがき

第3章では、調温調湿可能な二つの chamber の間に吸放湿を有する繊維材料(以後 ANW と称する)と有さない繊維材料(以後 ENW と称する)を並べて挟み、非定常から定常的状态の吸放湿繊維材料の水蒸気及び熱移動の実験的解明を試みた、文献[5,6]. 水蒸気移動がほとんど無い条件下(以後 DHL と称する)では、熱伝導率がほぼ同じ ANW と ENW 両試料の熱伝導特性は等しい温度変化を示す. 一方、chamber 間の温度差約 7°C、相対湿度差 30% の条件下(以後 WHL と称する)においては、ANW の初期段階の吸着熱による急激な温度上昇を経て、吸着平衡に達すると想定される. よって、熱伝導現象は DHL の温度変化(分布)に回帰するものと思われる.

一方、25°C、相対湿度 5%~80%時の ANW の熱伝導率は、Fig.2.7 より、約 10%増加する. このことは高湿度にさらされた ANW は、逆に試料表裏の温度差の減少が想定される. しかし、ANW、ENW の表裏温度差は常に ANW が ENW より約 1.0°C程度上回る傾向を示した. このことは定常的な状態においても、試料内では、何らかのメカニズムによって、保温性能が向上していることを示唆するものである. よって、数値解析モデルを考えることにより、ANW の温度上昇の要因及びメカニズムの解明が期待される.

また、本実験は、極端な実験条件での測定例である. 実用的な衣服環境下では、温度上昇や温度差が分かりにくい場合や測定誤差と見なされるような例においても、数値解析によって、有効な効果を予測出来るかもしれない.

従って、本章では、数値解析モデルを設定し、水蒸気の吸脱着による発熱及び吸熱を伴う一次元非定常熱伝導および水蒸気拡散を考え、数値解析による温度変化及び水蒸気濃度変化の解明を試みる.

## 4. 2 解析モデル

### 4. 2. 1. 基礎方程式

第3章の実験について、次のような数値解析モデル Fig.4.1 を考えた。

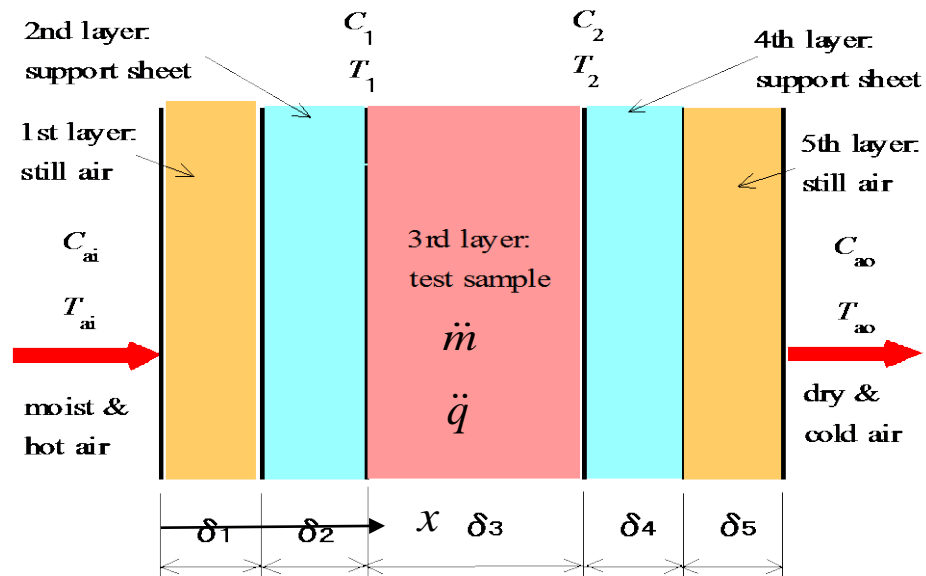


Fig. 4.1 Analytical model

Fig. 4.1 の各層の基礎方程式は以下のようなになる。

熱伝導方程式は

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{\rho c} \quad (4-1)$$

なお、空気層、支持紙及び ENW では右辺第 2 項の吸脱着熱の項はないとする。

なお、各層の  $\alpha$  は一定とした。

水蒸気拡散方程式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{app} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \dot{m} \quad (4-2)$$

(4-2)式は文献[18]で繊維集合体などの透湿度を見かけの拡散係数  $D_{app}$  を用い評価する場合に採用した方法である。但し水蒸気は、分子拡散のみで通気の影響はないとし、静止空気層は  $D_{app}=D_{air}$  とした。

同様に空気層、支持紙及び ENW では右辺第2項の水分の吸脱着はないとする。

次に、水分収支と試料の吸脱着量を次式に示す

$$\dot{m} = \frac{\partial(\rho W)}{\partial t} = h'A'(C - C_s) \quad (4-3)$$

ここで、 $h'$  は物質伝達係数、 $A'$  は試料内の繊維素材の吸脱着有効表面積である。

同様に空気層、支持紙及び ENW では吸脱着は考慮しない。

(4-1)式中の吸脱着熱の項は(4-3)式の水分の吸脱着量  $\dot{m}$  と吸脱着熱  $\gamma$  で発熱量が決まる。

$$\dot{q} = \dot{m}\gamma = \gamma h'A'(C - C_s) \quad (4-4)$$

なお、(4-3)、(4-4)式中の  $C_s$  は試料内の水分量  $W$  と試料内空気温度で吸着平衡と仮定した場合の相対湿度  $RH$  から求めた試料界面近くの仮想の水蒸気濃度とし、 $C-C_s$  を仮想の推進力とする。これは文献[19,20]で採用した方法で時間経過とともに  $C_s$  は変化し、 $C$  に近づき、吸着平衡となると自動的に推進力がなくなる。しかし、試料の前面と後面に接する支持紙内空気は温度及び水蒸気濃度分布があり、その前面近傍要素と後面近傍要素では試料表面要素より前者では温度及び水蒸気濃度が高く、後者では温度及び水蒸気濃度が低く、吸着等温線の熱力学的平衡から若干ずれると考え、前者では吸着が、後者では脱着が継続すると仮定した。



#### 4. 2. 2 境界条件及び初期条件

$$\begin{array}{ll}
 D = D_{air} & \text{(空気層内側)} \\
 D = D_{app1} & \text{(\delta}_1\text{内)} \\
 D = D_{app2} & \text{(\delta}_2\text{内)} \\
 D = D_{app3} & \text{(\delta}_3\text{内)} \\
 D = D_{air} & \text{(空気層外側)}
 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array}} \right\} \quad (4-5)$$

$$\text{初期条件: } t=0 \text{ で, } \quad \left. \begin{array}{l} T = T_0 \\ C = C_0 \end{array} \right\} \quad (4-6)$$

$$\text{境界条件 2: } t > 0, \quad \left. \begin{array}{ll} T = T_i & \text{(空気層内側)} \\ C = C_i & \text{(空気層内側)} \\ T = T_0 & \text{(空気層外側)} \\ C = C_0 & \text{(空気層外側)} \end{array} \right\} \quad (4-7)$$

#### 4. 3 数値解析結果及び考察

非定常熱伝導解析プログラムと非定常拡散解析プログラムを、(3)及び(4)式で連成することでWHLの数値解析プログラムを作成した。なお、差分は直接、式(4-1)および式(4-2)からではなく、層の厚さが異なり、境界要素も複雑化するため、5層の定常熱伝導と仮定し、別途コントロールボリューム法で導き、プログラム化した。付録A-2に示す。

##### 4. 3. 1 各層の熱物性値及び諸元

各層の熱物性値及び諸元をTable4.1に示す。この条件を基に数値解析を行う。これらの値は実測値や文献[21]による値及び推定値である。特に水蒸気の拡散係数については、空気は文献[22]からの値であるが、支持紙及び試料は3章で述べた見かけの拡散係数  $D_{app}$  で支持紙の場合は測定値を参照し、試料ANWの場合は推定値である。とくにANWは文献[18]の方法では吸着があり測定できない。

Table 4.1 Dimensions and thermal properties of each layer

	厚さ $\delta$ [m]	温度拡散率 $\alpha$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	拡散係数 $D$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	熱伝導率 $\lambda$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]	密度 $\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	比熱 $c$ [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ]
静止空気	$4.60 \times 10^{-3}$	$2.212 \times 10^{-5}$	$2.500 \times 10^{-5}$	$2.620 \times 10^{-2}$	1.176	$1.007 \times 10^3$
支持紙	$5.00 \times 10^{-4}$	$1.481 \times 10^{-7}$	$1.400 \times 10^{-6}$	$6.00 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^2$	$1.35 \times 10^3$
試料	$4.00 \times 10^{-3}$	$3.338 \times 10^{-7}$	$3.400 \times 10^{-6}$	$4.63 \times 10^{-2}$	$1.02 \times 10^2$	$1.36 \times 10^3$

#### 4.3.2 試料の水分吸湿量[5, 6]

基礎方程式(4-1)及び(4-2)と(4-3)及び(4-4)式を繋げるためには、試料の吸着等温線が重要である。Fig.4.2にその測定結果と用いた近似式を示す。このデータを組込むことで試料が吸収できる水分量に上限を設けている。Fig.4.2には「4.3.3.2の計算条件 CASE A」での  $RH$  の範囲を示す。定常近くの試料では更に狭い  $RH$  の範囲となる。

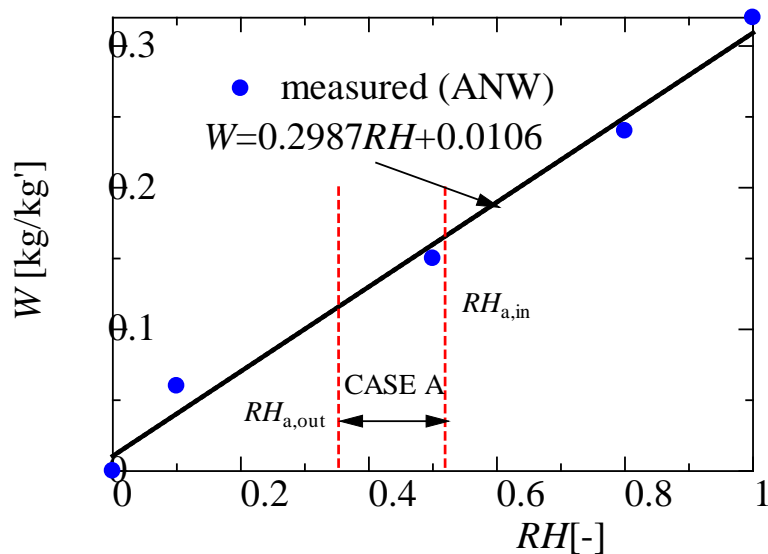


Fig. 4.2 Measured results of adsorption isotherm of ANW

#### 4.3.3 数値解析結果例

3章で述べた実験では、温度、水蒸気濃度は実用的条件とは異なり、また初期条件には遅れがある。数値解析では厳密に実験測定値をシミュレーションするというより、解析モデルと諸パラメータによる温度変化及び水蒸気濃度変化の一般的傾向を捉えることが主眼であるので、境界条件は Table4.2 のようにした。

また初期条件は、解析モデルの全体が、出口の温度及び水蒸気濃度と同等とし、ANW は、この条件における吸脱着平衡時の水分量  $W$  をもっているとした。

Table 4.2 Numerical values of boundary conditions (CASE A and B)

	空気層入口	空気層出口
温度条件:A,B共通	$T_{ai}=30^{\circ}\text{C}$	$T_{ao}=20^{\circ}\text{C}$
水蒸気濃度条件:A	$C_{ai}=0.016\text{kg}/\text{m}^3$	$C_{ao}=0.006\text{kg}/\text{m}^3$
水蒸気濃度条件:B	$C_{ai}=0.016\text{kg}/\text{m}^3$	$C_{ao}=0.001\text{kg}/\text{m}^3$

#### 4. 3. 3. 1 DHL あるいは吸脱着のない試料の計算例

DHL の実験は乾燥空気で行ったが、数値計算は吸脱着がなく、水蒸気濃度変化もなく、(4-1)式のみで熱伝導解析をしたことになる。しかし、ここでは本解析プログラムの妥当性の検証を含め、吸放湿の無い ENW の場合、つまり  $h'=0$  とした試料表裏の温度変化及び水蒸気濃度変化について、Fig.4.3 及び Fig.4.4 に示した。水蒸気濃度変化は数十秒程度で定常となるが、温度変化は 400 秒程度かかることがわかる。なお、試料表裏の温度差は最終的に  $1.83^{\circ}\text{C}$  となっている。また、この値は 5 層の定常熱伝導の式から求めたものと同じである。

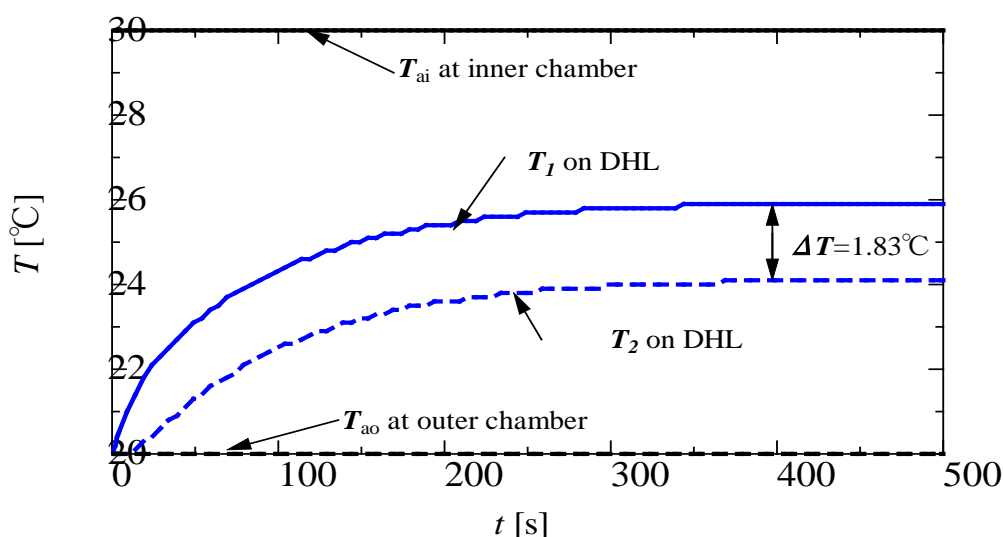


Fig. 4.3 An example of numerical results of temperature change  $T_1$  and  $T_2$  (in the case of DHL-A or WHL without adsorption/desorption)

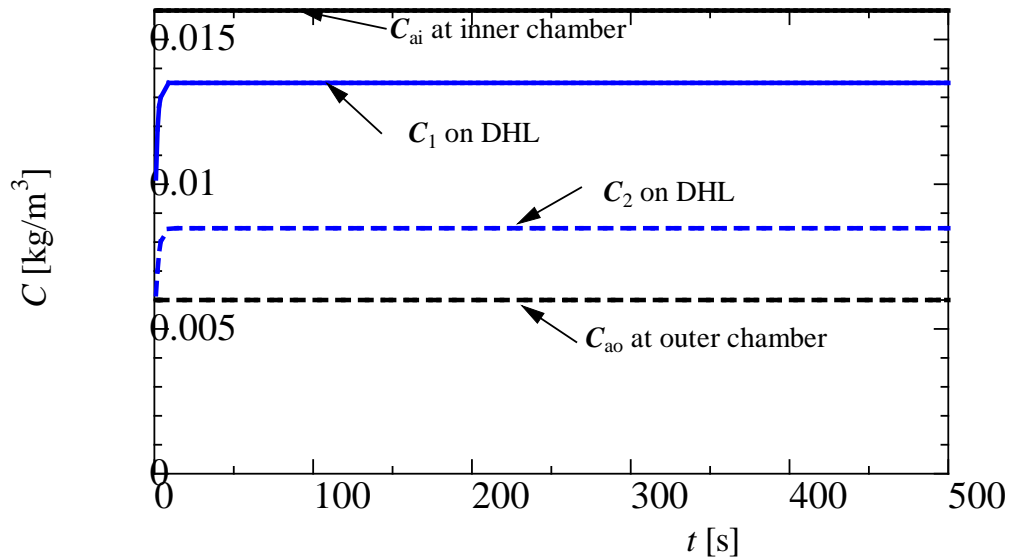


Fig. 4.4 An example of numerical results of water-vapor concentration change  $C_1$  and  $C_2$  (in the case of DHL-A or WHL without adsorption/desorption)

#### 4. 3. 3. 2 WHL での計算例 (CASE A の場合)

WHL の数値解析は、当初 Table4.2 の CASE A の湿り空気出口条件で行った。

(4-1)及び(4-2)式を連成するために、パラメータ (吸脱着熱  $\gamma$ , 物質伝達係数  $h'$  及び試料の有効表面積  $A'$ ) を種々変化させて数値解析を試みた。

その結果、Table4.3 の条件が、実験結果を説明するのに妥当と考えられる。

なお、吸脱着熱  $\gamma$  は推定値であるが、物質伝達係数  $h'$  及び有効表面積  $A'$  は全くデータがなく、推定もできない。計算では(4-3),(4-4)式のように常にその積となるので、パラメータとして扱った。その際、試料内部では試料の最高温度の到達点が実験結果に近くなるよう、試料入口及び出口の温度と試料外の温度差があまり大きくならないように選んだ。

なお、試料層の差分メッシュは 30 区分で、吸脱着試料で入口部及び出口部を扱うのは支持紙との境界部のみで扱い、1 メッシュつまり試料層厚さの 1/30 とした。厳密にはこの大きさもパラメータの一つである。

試料表裏の温度変化及び水蒸気濃度変化の計算例をについて、それぞれ Fig.4.5 および Fig.4.6 に DHL あるいは吸脱着がない場合との比較で示した。さらに、Table4.3 の試料 (入口) 及び試料 (出口) でパラメータ  $h' \times A' = 0$  とした CASE A' の結果も示した。

Fig.4.5 に示すように温度変化ははじめ急上昇し、180 秒程度で DHL あるいは吸脱着がない場合に比べ  $2^{\circ}\text{C}$  程度高い最高温度となる。その後、緩やかに低下し、7200 秒程度ではほぼ定常なる。その際、試料表裏の温度差は  $2.45^{\circ}\text{C}$  となる。この温度差は最高温度を過ぎた以後は変わらず、DHL あるいは吸脱着がない場合との差は  $0.62^{\circ}\text{C}$  であった。CASE A' の結果は最高温度も低くなり、温度差も DHL の場合とほぼ同程度となり、7200 秒程度ではほぼ定常になる。一方、水蒸気濃度の変化は DHL あるいは吸脱着がない場合と違い、吸着による水蒸気濃度の減少で遅れ、7200 秒程度までではほぼ定常なり、DHL あるいは吸脱着がない場合に近づく。

Table 4.3 Numerical values of parameters ( $\gamma$  and  $h' \times A'$ )

	吸脱着熱 $\gamma$ [J/kg]	$h'$ [m/s] $\times$ $A'$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
試料 (入口)	3000000	100
試料 (内部)		2000
試料 (出口)		100

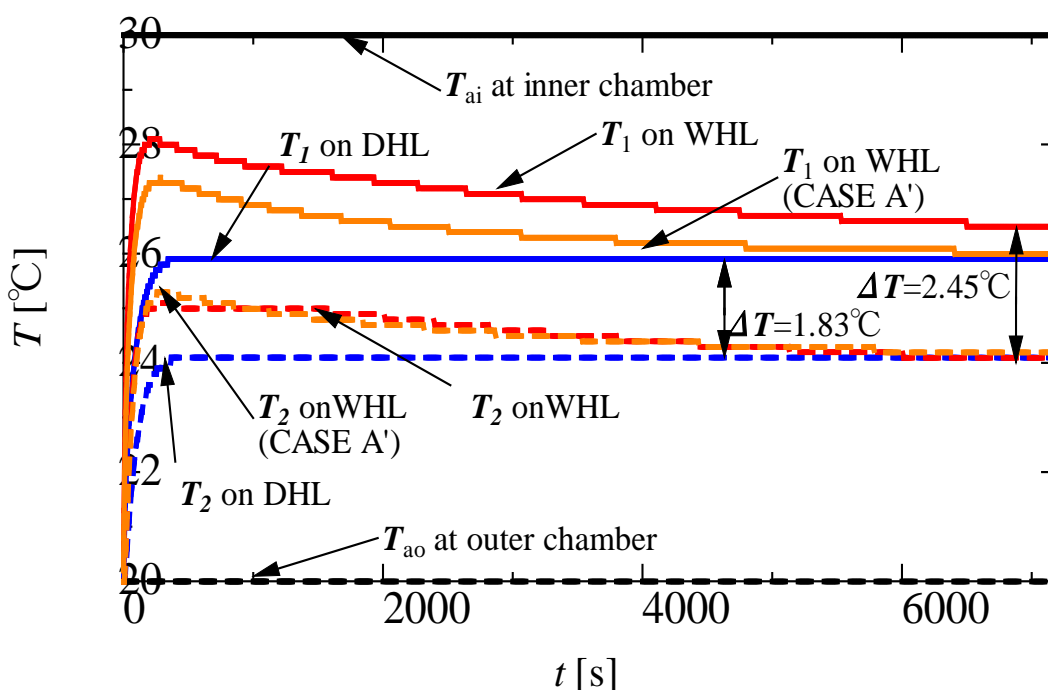


Fig. 4.5 An example of numerical results of temperature change  $T_1$  and  $T_2$   
(in the case of WHL-A)

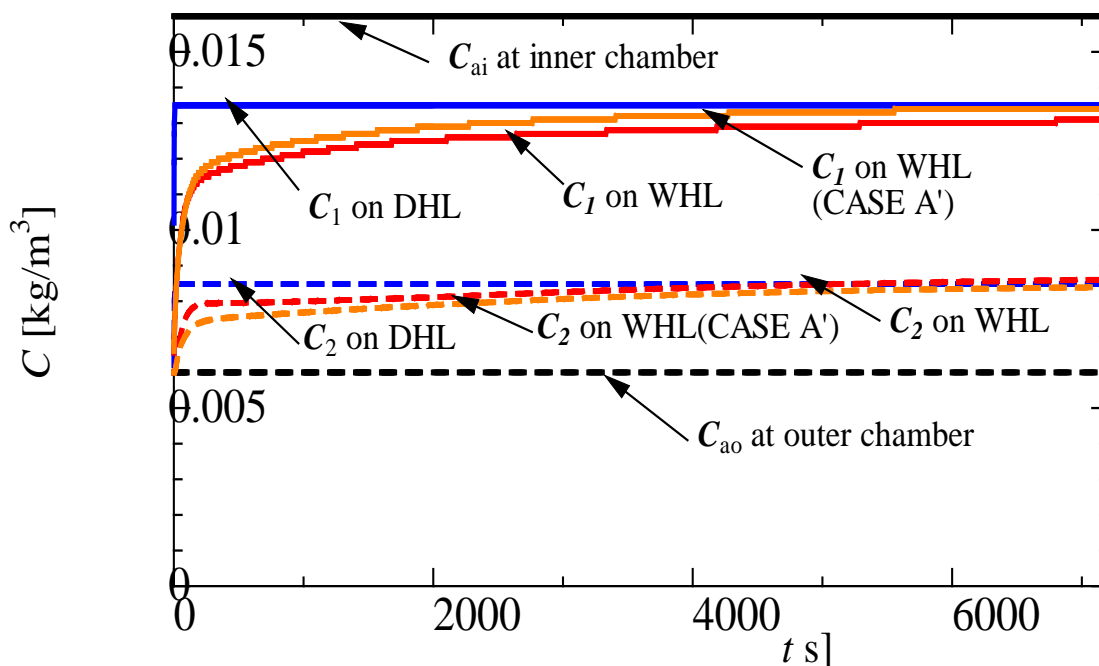


Fig. 4.6 An example of numerical results of water-vapor concentration change  
 $C_1$  and  $C_2$  (in the case of WHL-A)

#### 4. 3. 3. 3 WHL での計算例 (CASE B の場合)

実際の実験では、計算条件 ( $10^{\circ}\text{C}$ ) の半分となり、温度差も  $0.62/2^{\circ}\text{C}$  程度となる。よって、測定誤差との分離が困難である。そこで、空気層出口の水蒸気濃度初期条件を乾燥空気 (CASE B) とした実験も行った。その試料表裏の温度変化及び水蒸気濃度変化の計算例を、DHL あるいは吸脱着がないケースと比較した。Fig.4.7 及び Fig.4.8 に各々の結果を示す。

さらに、Table4.3 の試料 (入口) 及び試料 (出口) でパラメータ  $h' \times A' = 0$  とした結果を CASE B' に示した。

Fig.4.7 に示すように、温度は、急上昇し、180 秒程度で DHL あるいは吸脱着がない場合に比べ  $7^{\circ}\text{C}$  程度高く最高温度に達する。その後緩やかに低下するが、7200 秒後も定常に至っていない。その際、試料表裏の温度差は  $2.89^{\circ}\text{C}$  である。この温度差は最高温度を過ぎた以後からほとんど変わらず、DHL との差は  $1.06^{\circ}\text{C}$  あり、実験結果と比較しても、ほぼ同程度である。次に、CASE B' の結果は、最高温度も低く、温度差も DHL の場合と同程度で、7200 秒でほぼ定常となる。

一方、水蒸気濃度の変化は、吸着による水蒸気濃度の減少で CASE A の場合に比べさら

に遅れ, 7200 秒で漸く定常なり, DHL あるいは吸脱着がない場合に近づく.

このように静止空気層出口の水蒸気濃度を乾燥空気程度とすると, 初期の温度上昇も大きくなり, 定常時付近の試料表裏の温度差も大きくなる.

これも実験結果の傾向と一致する.

また, CASE B の試料内及び両支持紙内の温度分布及び水蒸気濃度分布の変化例と DHL あるいは吸脱着がない場合の変化例をそれぞれ Fig.4.9 及び Fig.4.10 に示す.

Fig.4.9 の ANW 内の温度分布は, 80s 及び 500s で約 3~5°C 程度高くなり, その後低下するが, 定常となる 5000s でも, DHL あるいは ENW 内の温度分布に比べ, 約 1°C 高いままである. Fig.4.10 の ANW 内の水蒸気濃度分布は, 80s 及び 500s でも水蒸気濃度の上昇が遅れている. これは試料内の水蒸気が吸着されるからである. Fig.4.8 にも示したように DHL あるいは ENW 内の水蒸気濃度は約 10s 程度で定常となる.

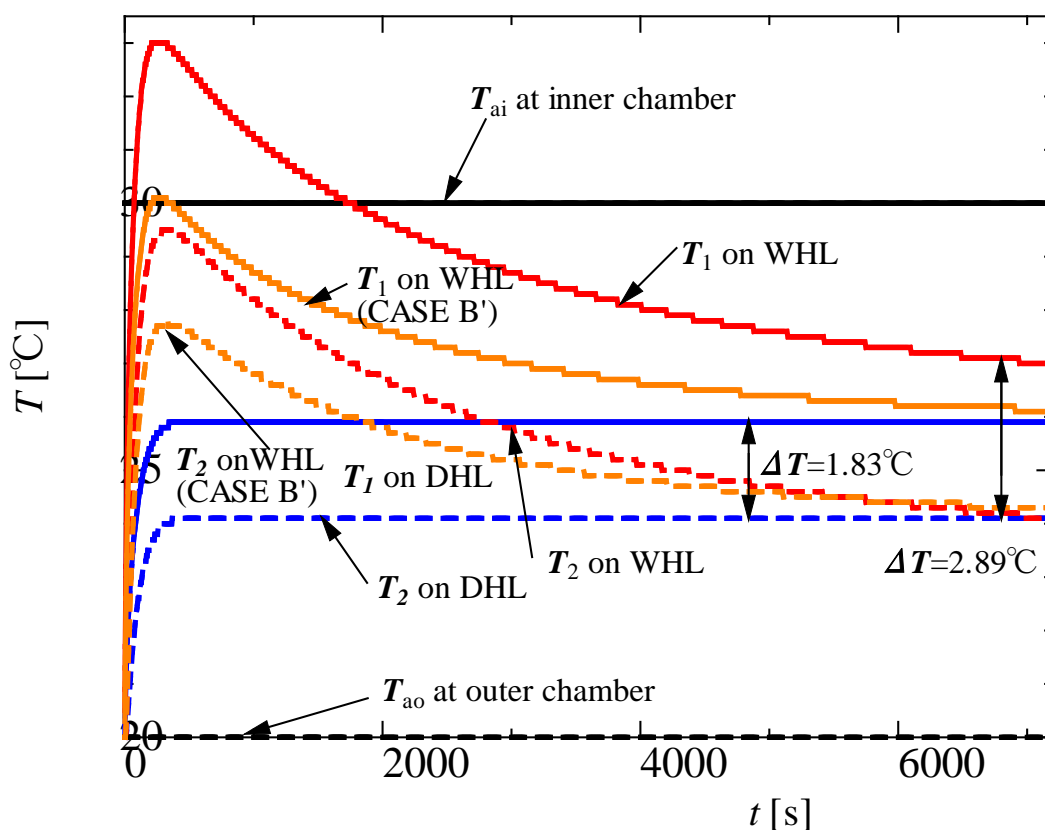


Fig. 4.7 An example of numerical results of temperature change  $T_1$  and  $T_2$

(in the case of WHL-B)

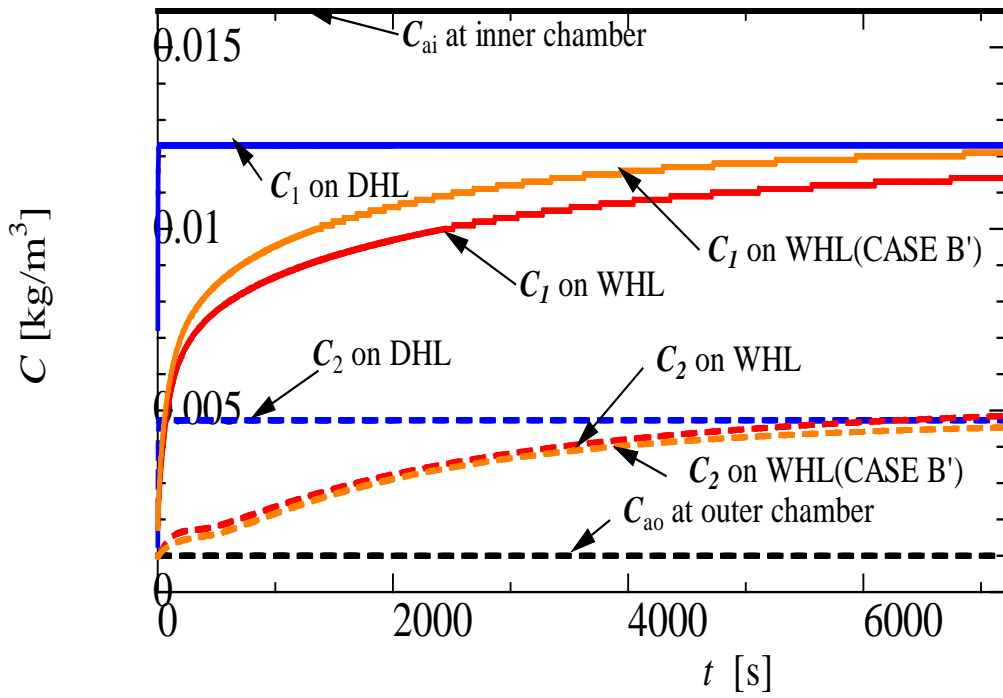


Fig. 4.8 An example of numerical results of water-vapor concentration change  $C_1$  and  $C_2$  (in the case of WHL-B)

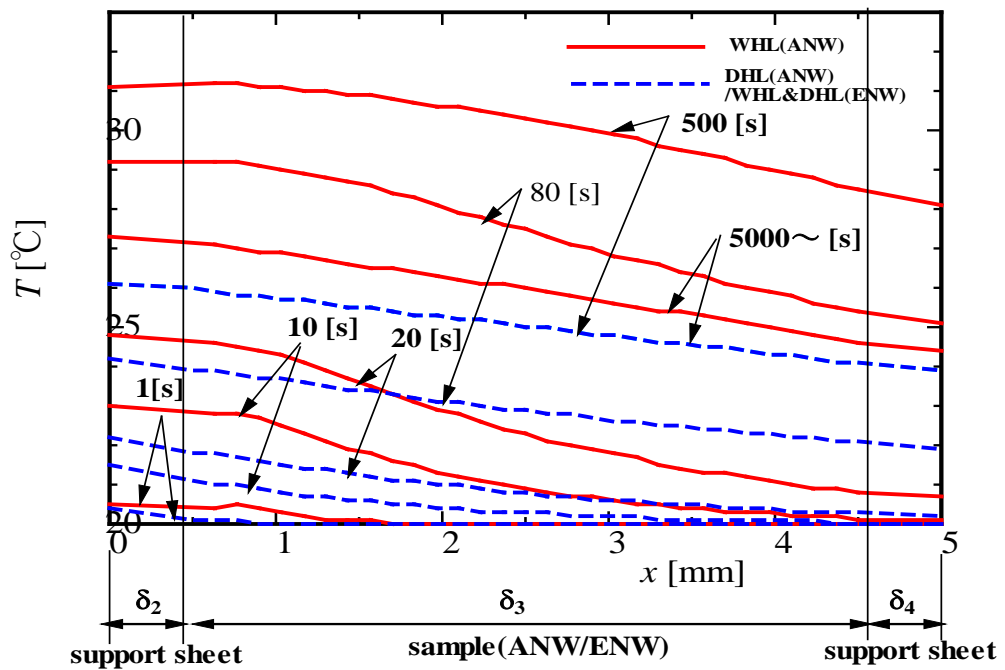


Fig. 4.9 An example of numerical results of temperature distribution change in a sample and both support sheets (in the case of WHL-B)



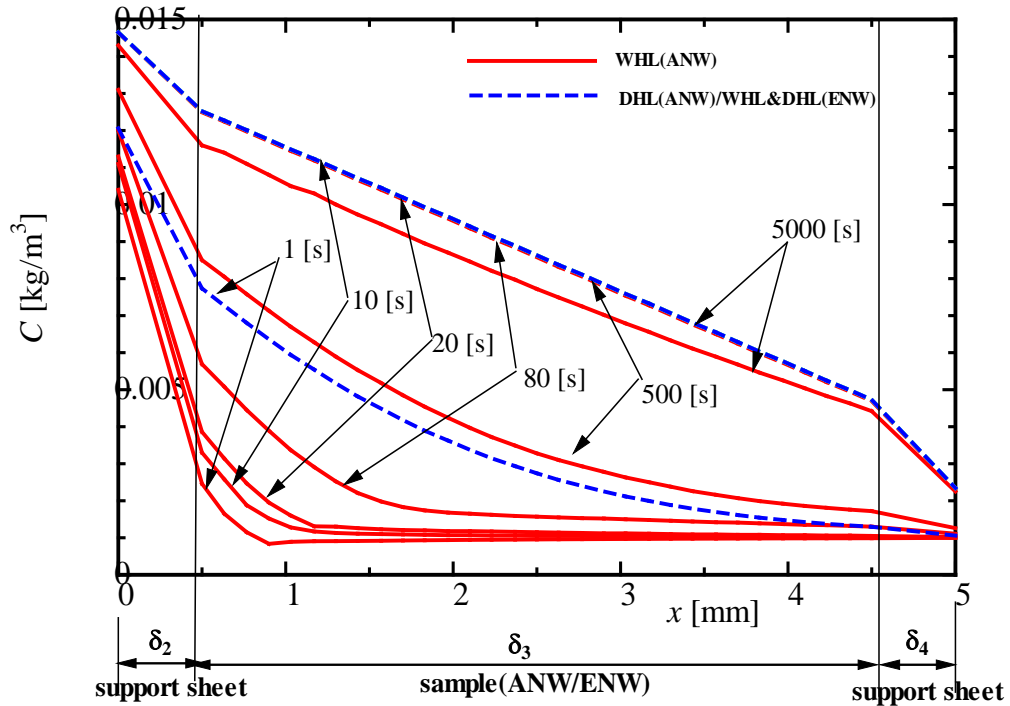


Fig. 4.10 An example of numerical results of water-vapor concentration distribution change in a sample and both support sheets (in the case of WHL-B)

#### 4. 3. 3. 4 実験結果と数値計算 (CASE C の場合) の比較例

Fig.4.11 に実験結果と数値計算の比較例を示した. なお, この実験例の境界条件を Table4.4 (CASE C) に示す. 温度差は  $2.6^{\circ}\text{C}$  と小さい. また測定は, なるべく室温近くに保つ様に行ったので, 初期条件は CASE A 及び CASE B の場合と異なり, 水蒸気濃度は出口と同じであり, 室温 ( $27.0^{\circ}\text{C}$ ) とした.

この条件で, ANW は, 吸着平衡の水分量  $W$  をもっているとし, 出口空気は冷却している. さらに, Table4.3 の試料 (入口) 及び試料 (出口) でパラメータ  $h' \times A' = 0$  とした CASE C' の結果も併せて示した.

Table 4.4 Numerical values of boundary conditions (CASE C)

	空気層入口	空気層出口
温度条件:C	$T_{ai}=28.3^{\circ}\text{C}$	$T_{ao}=25.7^{\circ}\text{C}$
水蒸気濃度条件:C	$C_{ai}=0.017\text{kg}/\text{m}^3$	$C_{ao}=0.005\text{kg}/\text{m}^3$

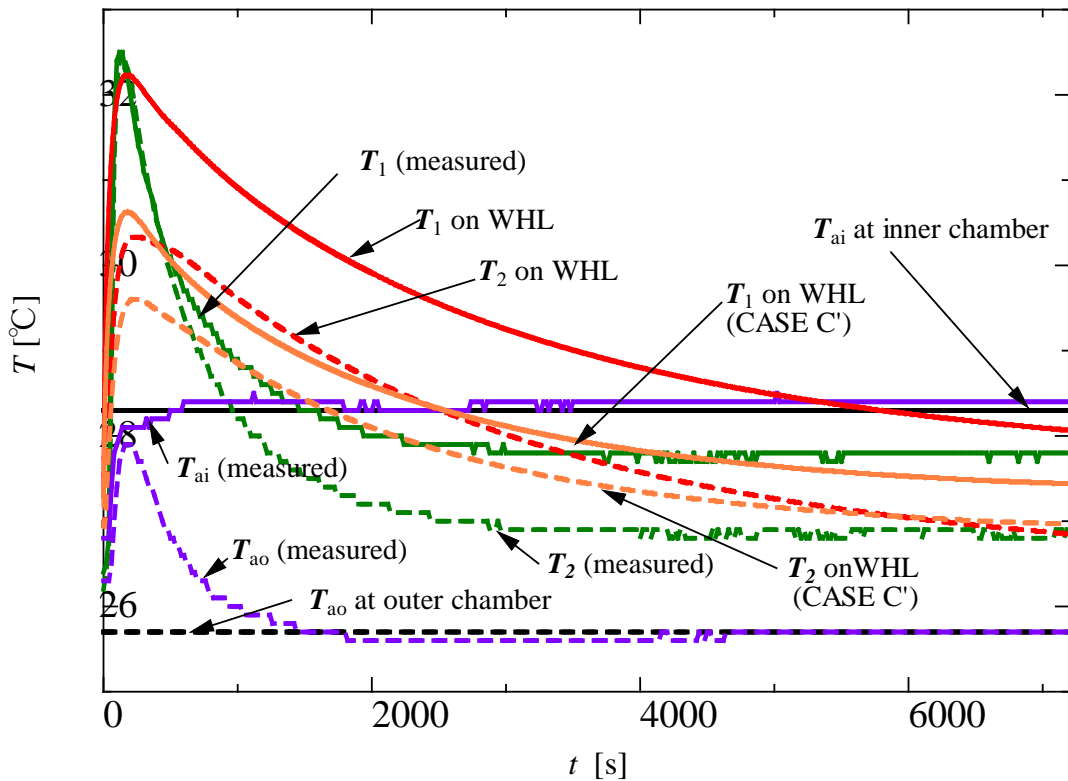


Fig. 4.11 An example of the comparison between the numerical results and the measured results(in the case of C)

Fig.4.11 の実験例と数値計算の比較では、初期の温度上昇も同程度となり、定常付近での試料表裏の温度差もほぼ等しい。これは実験結果の傾向と一致する。

しかし、定量的に厳密に比較すると、例えば、Fig.4.11 の実験例の温度の急上昇では試料裏面の温度が表面温度と同程度になることや、急上昇後の急激な温度低下など、数値解析結果と異なる。これらの要因の一つとして、通気の影響等が挙げられるが、解析モデルでは、通気の影響は考慮していない。

なお、パラメータ  $h' \times A' = 0$  の計算は、試料表裏要素内に水蒸気が拡散し、内部と同じ

よう試料表裏でも吸脱着が起こり、吸着平衡に達すると以後吸脱着は起こらない場合にはほぼ相当する。

実測値との定量的な議論については、解析モデルの再検討と支持紙及び試料の見かけの拡散係数  $D_{app}$  等、各層の物性値の再検討も必要である。特にパラメータ  $h' \times A'$  について、それぞれ分離して評価できるデータが必要である。また、通気の影響のないさらに定量的な再現性をもつ実測値も必要である。

この数値解析結果では実験結果と同様な定性的な傾向を示し、定常付近でも ANW での温度上昇あるいは温度差の増加も見られ、保温性向上のメカニズム解明の一例とすることができたと考えられる。

#### 4.4 まとめと問題点

- (1) 非定常熱伝導と非定常水蒸気拡散を連成する解析プログラムでは、試料内部で吸着平衡になっても、試料表裏では吸着平衡にならないと仮定した。
- (2) 数値解析モデルに基づく ANW の解析結果例から、初期の温度上昇と定常時付近の試料表裏の温度差の増加が示され、実験結果の傾向と一致した。これは定常時付近でも ANW の温度上昇あるいは温度差の増加の要因及びメカニズム解明の一例とすることができたと考える。
- (3) 実測値との定量的な議論については、解析モデルの再検討と使用した熱物性値やパラメータ値等の再検討が必要である。特にパラメータ  $h' \times A'$  について、それぞれ分離して評価できるデータが必要である。

## 第5章 吸放湿繊維材料の水蒸気及び熱移動に関する

### 赤外熱画像による可視化と数値解析

#### 5.1 まえがき

本章では、発熱の持続性をより正確に検証する為に、Fig.5.1 に示す新たな実験装置を作製し、水分の吸脱着を有する試料と有さない試料の表面温度分布を点接触の熱電対に代えて、試料全体を赤外熱画像カメラで長時間に渡って可視化し、各試料全面の温度分布の推移を比較計測した。また、これら試料の温度推移が、試料表裏の界面付近に生じる温湿度条件とどのような相関性を有するか算出し、保温性との関係を考察する。

更に、4章の数値解析モデルを使用し、ニット素材における、水蒸気の吸脱着熱を伴う一次元非定常熱伝導及び水蒸気拡散を考慮した数値解析による温度変化と水蒸気濃度変化のシミュレーションを試みた。

#### 5.2 実験

##### 5.2.1 試料

実験試料は、塩型ポリアクリル酸系繊維を30%含むニット素材(Salt of Polyacrylic Acid-Knit Fabric: 以後 AKN と称する)とポリエステル繊維100%のニット素材 (Polyester-Knit Fabric: 以後 EKN と称する) である。両試料の生地設計は同等で、構成糸「#40番(綿番手)」, 生地密度「ウェール/コース=44/inch×30/inch」, 生地組織「ダブルフェース編」である。Table5.1 にそれぞれ試料の繊維組成と構造(厚さと重量)を示す。なお、5.2.2の方法の項で示す本実験においては、試料の上下を補助シート(support sheet)で挟んで3層にした状態で実験を行うため、そのシートについても表に示した。Table5.2は、相対湿度変化時(絶乾状態~90%RH)の各試料の水分率を表す。

Table5.1 Composition and structure(thickness/weight) of samples

	composition(%)	thickness(mm)	weight(g/m <sup>2</sup> )
<b>AKN</b>	<b>pal/pet=30/70</b>	<b>1.21</b>	<b>212.5</b>
<b>EKN</b>	<b>pet=100</b>	<b>1.10</b>	<b>193.4</b>
<b>support sheet</b>	<b>pet=100</b>	<b>0.33</b>	<b>433.3</b>

Table 5.2 Moisture content in the samples associated with

relative humidity change at 25°C (kg/kg'×100)

%RH	0	10	30	40	60	80	90
<b>AKN</b>	<b>0.0</b>	<b>3.6</b>	<b>6.3</b>	<b>7.6</b>	<b>8.9</b>	<b>15.2</b>	<b>20.5</b>
<b>EKN</b>	<b>0.0</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>1.1</b>

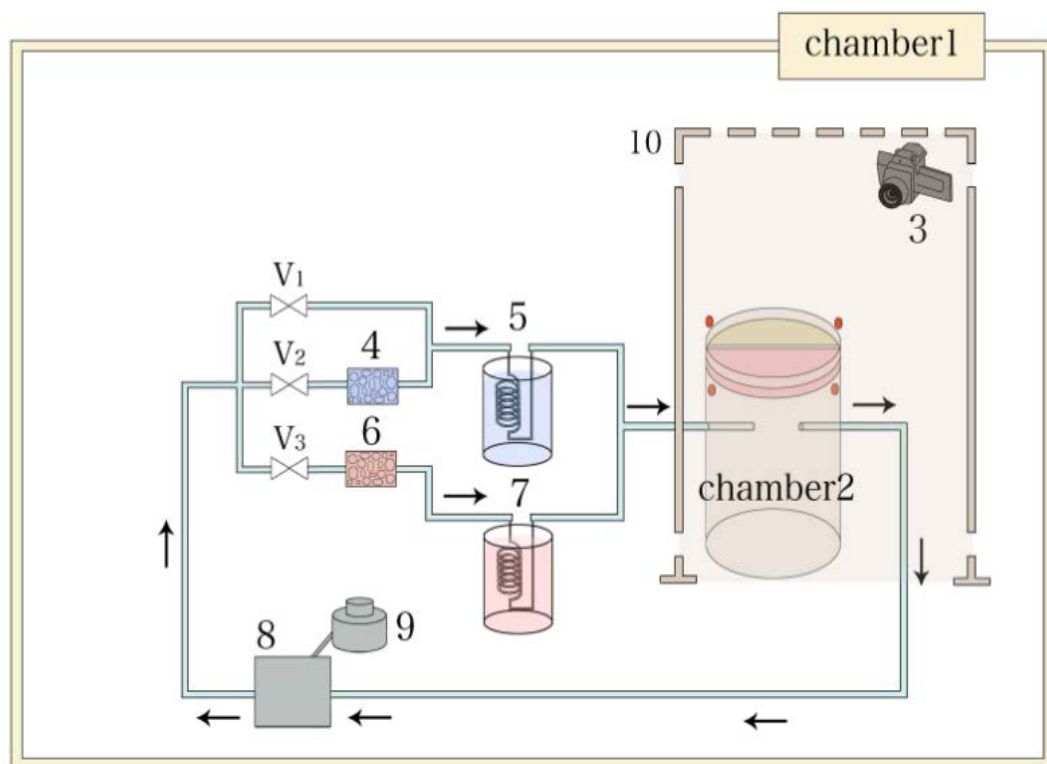
### 5. 2. 2 方法

実験装置の概略図を Fig.5.1 に示す. 温湿度を制御できる環境試験室(chamber1)の内部に, 試料を水平に取り付けた chamber2 を設置し, 上部(高さ:750mm, アングル 15deg.)より赤外熱画像カメラ(CHINO CAP8200)で撮影する.

気流の安定化を図るために, chamber2 は, mesh screen 内に設置した. カメラの熱画像は 320×240pixel である. chamber2 へ送入される調温調湿エア-は, 流量約 0.9l/min で循環しており, 実験条件に合わせ, 適宜 Valve(V<sub>1</sub>,V<sub>2</sub>,V<sub>3</sub>)を切替える事によって調整される. 水蒸気移動がほとんどない Dry Heat Loss(以後 DHL と称する)の条件は, chamber 間の湿度差を小さくし, 温度差だけを設ける方法である. よって, chamber1 をできるだけ除湿しドライ化し, chamber2 は, V<sub>1</sub>を経由したエア-を冷水槽 5 を通し送入することによって更に冷却した. 次に, chamber 間に温湿度差を設けた Wet Heat Loss(以後 WHL と称する)の条件は, 二種類(WHL I, WHL II)に大別する.

WHL I の条件は, 衣服内環境を想定し chamber1 を温度約 30°C, 湿度約 70%RH の温暖多湿化し, chamber2 へは, V<sub>2</sub>から充填層 4 を通し 5%RH 以下にドライ化し 0°Cの冷水槽 5 で低温化したエア-を送入し冷却する. 次に, WHL II の条件は, chamber1 を

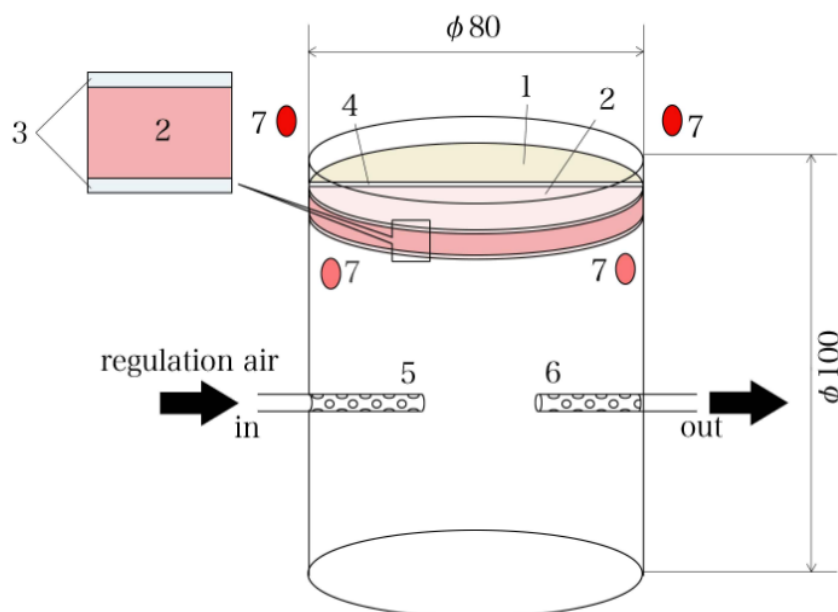
温度約 20°C，湿度約 35%RH とし，chamber2 は，衣服内環境を想定し，V<sub>3</sub>から充填層 6 を通し 70%RH 以上にウェット化し，70°Cの温水槽 7 で高温化したエア－を送入し 温暖多湿化した．この二つの条件を設ける事によって，試料及び赤外熱画像カメラを固定したまま，試料の表から裏，裏から表への水分及び熱移動の計測が可能となった．chamber2 の詳細図を Fig.5.2 に示す．調温調湿エア－は，微細メッシュ孔 5 から送入され 6 より排出される．また，温湿度センサーは，両試料表裏付近 7 に設置した．両試料の形状は，半円状で，試料の上下を support sheet に挟んだ 3layer である．次に，繊維材料の標準的な熱伝導率測定法(KES 法[12])を用い，相対湿度約 10～85%RH 時の両試料の熱伝導率を測定した．グラフは，(Fig.2.8)を参照願いたい．



- 1.chamber1:air-conditioned room, 2.chamber2: experimental chamber with test sample,
- 3.thermography camera, 4.dry filler layer, 5.cooling-coil & cool water bath, 6.wet filler layer,
- 7.heating-coil & hot water bath, 8.air pump, 9.variable transformer, 10.mesh screen for air control, ( V<sub>1</sub>,V<sub>2</sub>,V<sub>3</sub>). valve

Fig.5.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

但し、両試料とも本実験に合せ 3layer 状態での測定値である。また、10%RH 条件は、LiCL 半溶液[14]を用い確保し、30,60,80%RH 条件は、chamber1 の温湿度を適宜調整し確保した。



- 1.test sample (EKN), 2.test sample (AKN), 3. support sheet, 4.partition,  
5. duct with many holes for spraying air, 6. duct with many holes for sucking air, 7. thermocouple & moisture sensor

Fig.5.2 Schematic diagram of the chamber2

Fig.5.3 は、上部より撮影した両試料面の熱画像である。support sheet を介することによって、試料表面の微妙な熱変動を制御した。試料は、中央の仕切りを介し左右に取付けられており、試料の表面温度として、四角く囲んだ部分(約 400pixel) の平均温度をそれぞれ 15~30 秒毎に 10 時間以上測定し、その推移をグラフ化した[23]。

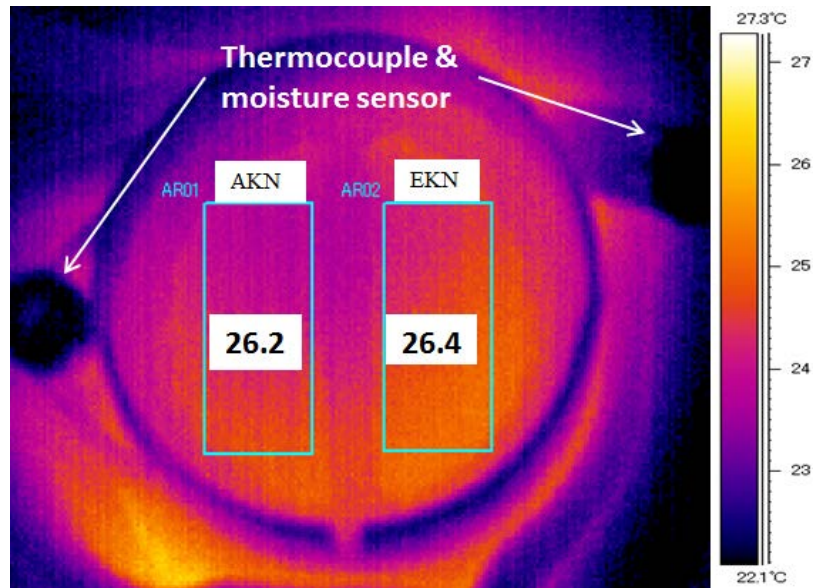


Fig.5.3 An example of infrared thermography sample

### 5. 3 結果

#### 5. 3. 1 DHL の条件時

DHL の条件は、chamber 間の温度差を大きくし、湿度差をできるだけ小さくする設定である。実験は、計 7 回行った。chamber 間の条件及び試料間の温度差を Table5.3 に示す。「 $\Delta T_c = T_{ai} - T_{ao}$ 」は、chamber 間の温度差、「 $\Delta C_c = C_{ai} - C_{ao}$ 」は、chamber 間の絶対湿度差を表し、「 $a_i$ 」は *air in*、「 $a_o$ 」は *air out* である。「 $\Delta t$ 」は、定常的状态と見なした測定時間、「 $\Delta T_s = T_I(\text{AKN}) - T_I(\text{EKN})$ 」は、試料間の温度差を示し、 $T_I$  は、「 $a_i$ 」側の表面温度を表す。また、「\*」印の結果を Fig.5.4, 5.5 に示した。Fig.5.4 の横軸は時間、縦軸は両試料面温度と両 chamber の温度を示す。次に、Fig.5.5 の左縦軸は、両試料面温度差( $\Delta T_s$ )及び chamber 間の温度差( $\Delta T_c$ )、右縦軸は chamber 間の絶対湿度差( $\Delta C_c$ )を表す。

約 3 時間経過後から 13 時間に渡る定常的状态は、chamber 間温度差が約 4°C、絶対湿度差は約 0.0015kg/m<sup>3</sup> となった。この条件下においては、両試料面の温度差は、ほとんど発生せず同等であった。よって、chamber 間絶対湿度差が極めて低い条件下においては、chamber 間に温度差があっても、試料間温度差は発生しにくいと云える。他の 2~7 の実



験においても概ね同様の結果となった. これらの結果と Fig.2.8 に示す相対湿度が低い領域の AKN と EKN の熱伝導率から, 両試料の熱流束は, ほぼ等しく, 熱流の一次元性が実現している事が示唆される.

Table5.3 Temperature and humidity differences between each chamber  
and surface temperature differences AKN and EKN in DHL condition

	$\Delta T_c = T_{ai} - T_{ao}$ (°C)	$\Delta C_c = C_{ai} - C_{ao}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta t$ (h)	$\Delta T_s = T_1 \text{ (AKN)} - T_1 \text{ (EKN)}$ (°C)
* DHL-1	3.88	1.55E-03	12	0.04
DHL-2	3.72	1.54E-03	5	0.04
DHL-3	3.81	1.35E-03	4	0.02
DHL-4	3.82	8.03E-04	12	0.08
DHL-5	3.68	9.75E-04	6	0.08
DHL-6	4.19	4.07E-03	8	0.00
DHL-7	2.52	5.61E-04	10	-0.03

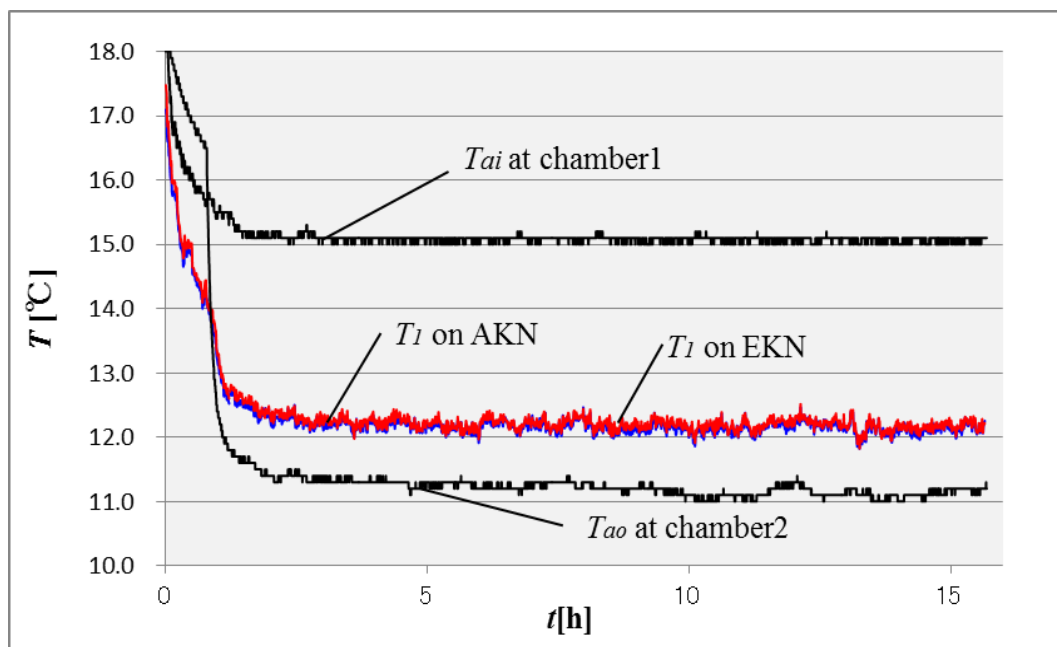


Fig.5.4 Temperature changes of each sample and each chamber in DHL condition

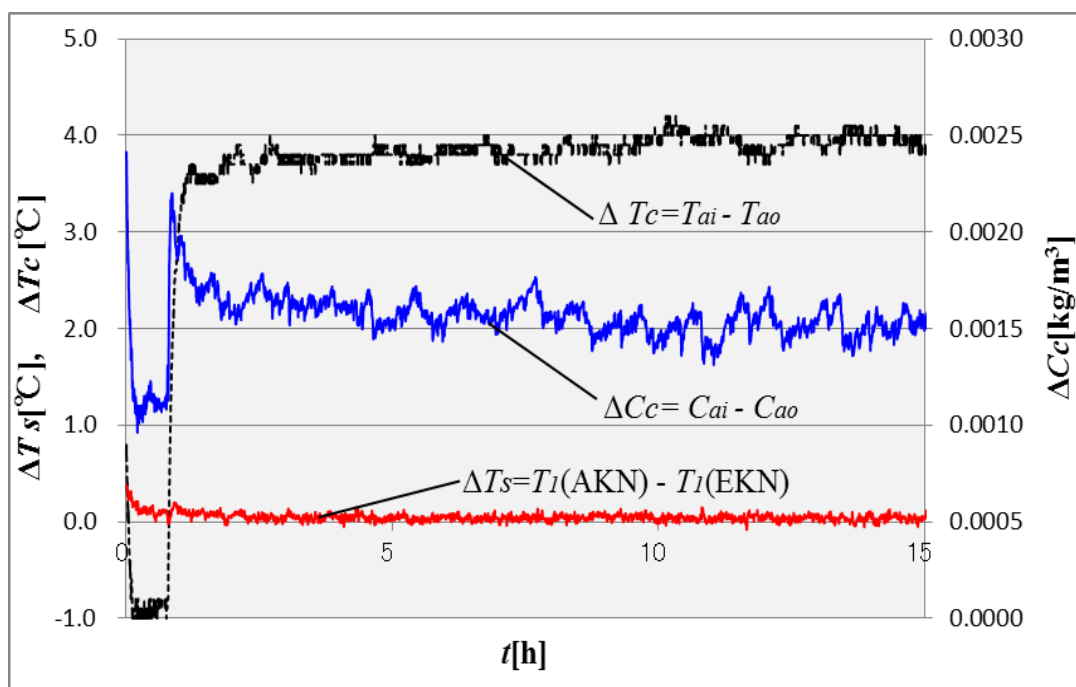


Fig.5.5 Relationship of the temperature/humidity differences between the chambers and the surface temperature differences between AKN and EKN in DHL condition

### 5. 3. 2 WHL I の条件時

次に WHL I の条件は、結露が起こらない範囲で、chamber 間の温湿度差をできるだけ大きくする設定である。実験は、計 8 回行った。chamber 間条件と試料間の温度差を Table5.4 に示す。同様に「\*」印の結果をグラフ化した。

Fig.5.6 は、2 時間経過時の熱画像である。AKN は、吸着熱の影響によって、初期には大きな温度上昇を示すが、約 2 時間程度で定常に近づく [23]。

一方、chamber2 は、長時間の温度条件が保持されていない。しかし、定常になった以後の境界条件の変化は「定常状態の変化」として扱えるので、この状態を準定常的状态 [4]とした。Fig.5.7, Fig5.8 から、準定常的状态は、約 3 時間経過後から 20 時間までとした。chamber 間の温度差は、約 4.8°C から約 2°C となるが、湿度差は、約 0.02kg/m<sup>3</sup> でほぼ一定である。この条件下の試料間比較では、AKN の方が EKN より約 0.25°C 高く、chamber

間の温度差の減少に比例し，約 0.1℃へと縮小する．他の 2～8 の実験においても，バラツキはあるものの，試料間の差は，同様に見られた．

Table5.4 Temperature and humidity differences between each chamber  
and surface temperature differences AKN and EKN in WHL I condition

	$\Delta T_c = T_{ai} - T_{ao}$ (°C)	$\Delta C_c = C_{ai} - C_{ao}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta t$ (h)	$\Delta T_s = T_I (\text{AKN}) - T_I (\text{EKN})$ (°C)
*WHL I -1	4.04	1.87E-02	10	0.27
WHL I -2	4.19	8.03E-03	5	0.15
WHL I -3	4.62	1.91E-02	5	0.27
WHL I -4	3.26	1.87E-02	5	0.18
WHL I -5	5.11	1.61E-02	5	0.38
WHL I -6	4.54	1.32E-02	10	0.35
WHL I -7	3.72	1.73E-02	15	0.10
WHL I -8	4.36	1.61E-02	5	0.14

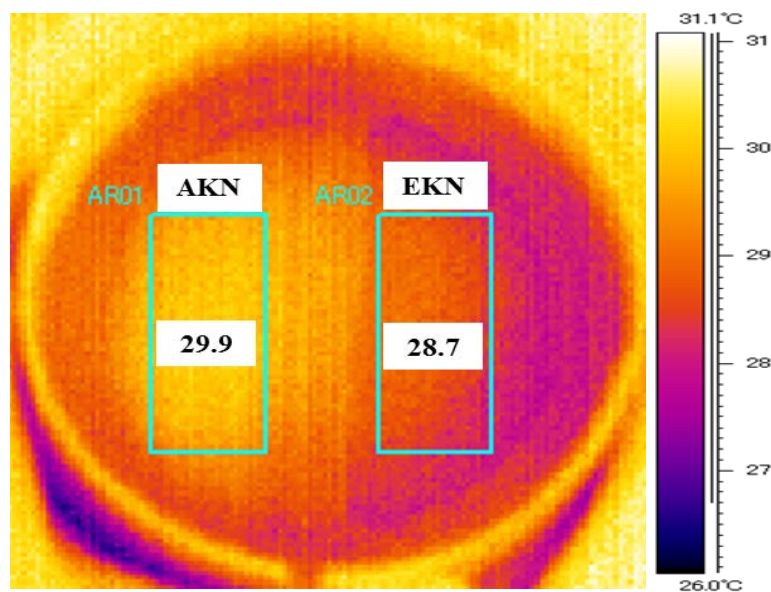


Fig.5.6 An example of infrared thermography sample

at the thermal region of adsorption

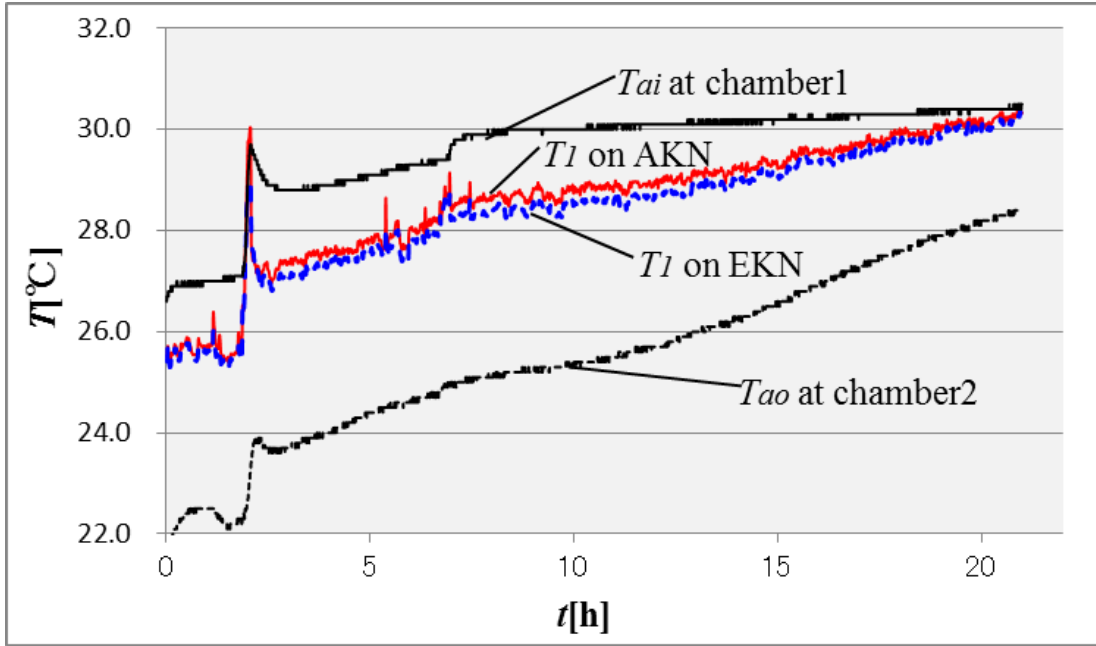


Fig.5.7 Temperature changes of each sample and each chamber

in WHL I condition

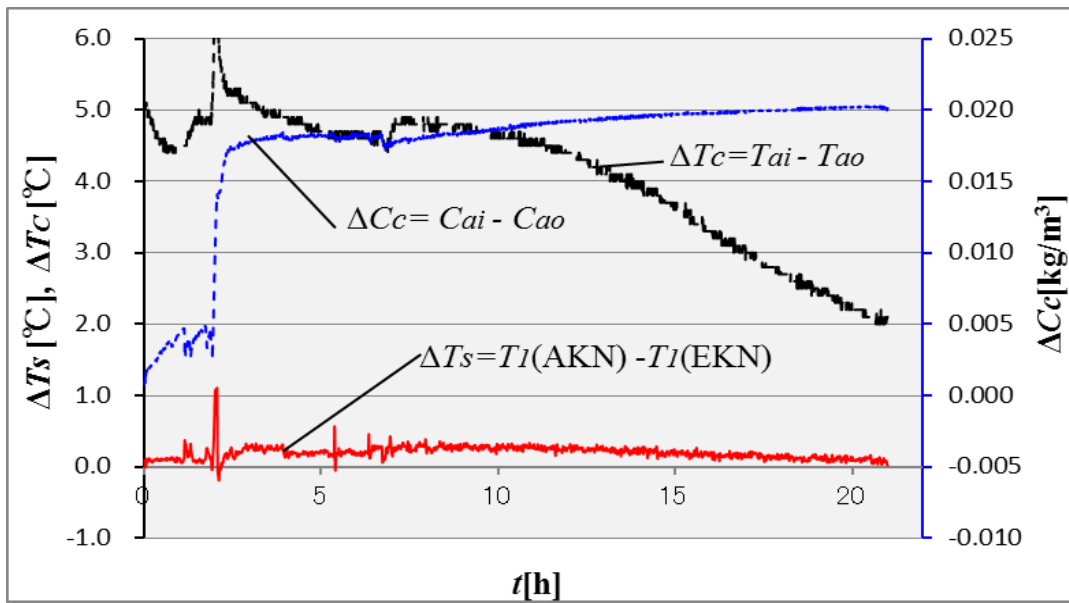


Fig.5.8 Relationship of the temperature/humidity differences between the chambers

and the surface temperature differences between AKN and EKN in WHL I condition

### 5. 3. 3 WHL II の条件時

WHL II は、WHL I の設定条件と反対になる。実験は、計 3 回行った。chamber 間条件と試料間の温度差を Table5.5 に示す。試料間温度差の「 $\Delta T_s = T_2(\text{AKN}) - T_2(\text{EKN})$ 」の  $T_2$  は、「ao」つまり *air out* 側面の表面温度となる。同様に「\*」印の結果をグラフ化した。

Fig.5.9 は、2 時間経過時の熱画像である。Fig.5.10, Fig.5.11 から、初期状態の AKN は吸脱着熱の影響によって、大きな温度変化を示すが、5 時間経過後から 45 時間までを準定常的状态とした。chamber 間温度差は約 2.1°C、湿度差は、0.007kg/m<sup>3</sup> である。この条件下での試料間比較は、AKN の方が EKN より約 0.2°C 低くなる。

また、時間経過に伴い、僅かであるが chamber 間温度差の拡大に呼応し、試料間温度差も増加する。他の実験結果も n 数は少ないものの概ね同様であり、熱電対による結果 [7] と同様の傾向となった。なお、WHL II の試料面温度差の変動が、WHL I より大きいのは、chamber1 の温湿度コントロールの振れ幅による影響である。

Table5.5 Temperature and humidity differences between each chamber  
and surface temperature differences AKN and EKN in WHL II condition

	$\Delta T_c = T_{ai} - T_{ao}$ (°C)	$\Delta C_c = C_{ai} - C_{ao}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta t$ (h)	$\Delta T_s = T_2(\text{AKN}) - T_2(\text{EKN})$ (°C)
WHL II -1	1.32	8.07E-03	5	-0.22
WHL II -2	1.85	7.88E-03	5	-0.26
*WHL II -3	2.11	6.88E-03	20	-0.37

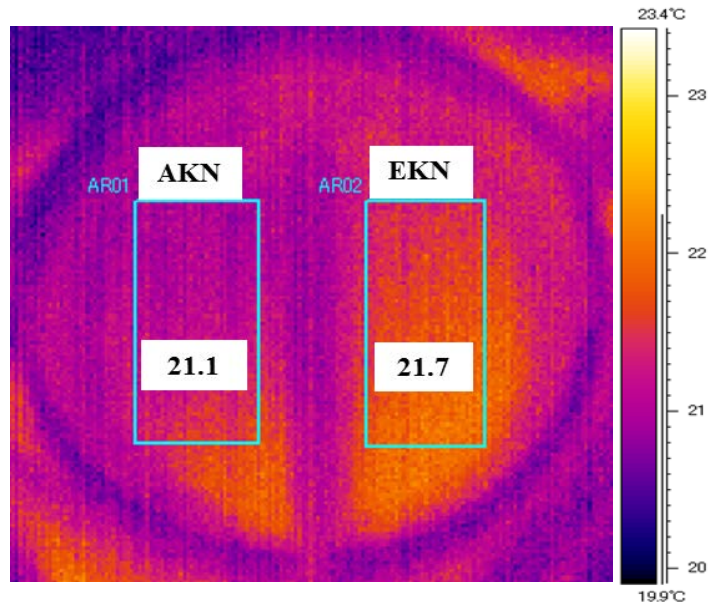


Fig.5.9 An example of infrared thermography sample  
at the thermal region of desorption

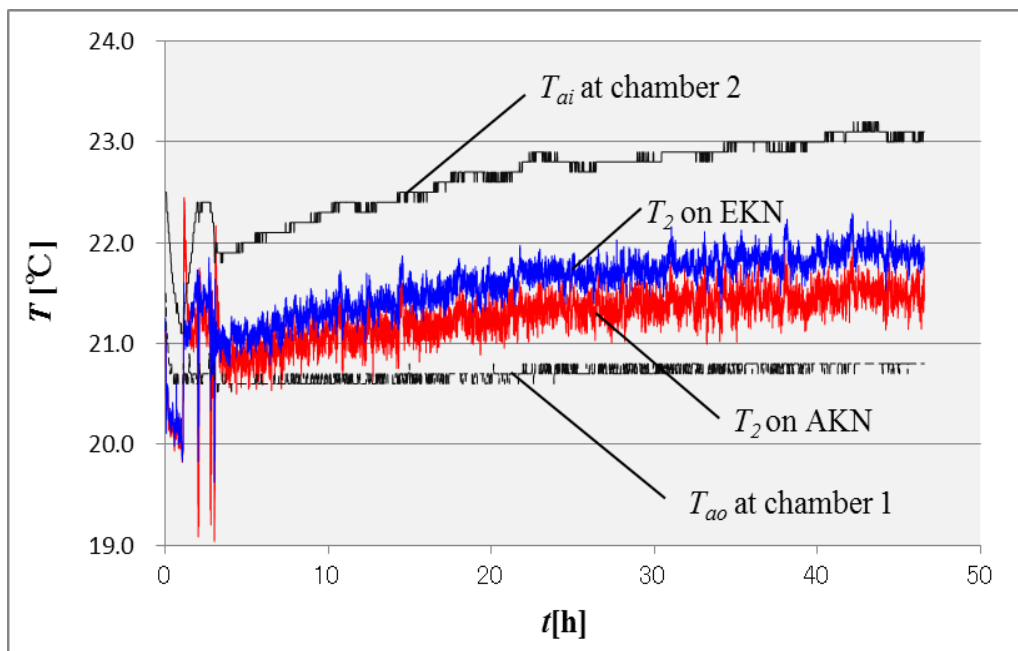


Fig.5.10 Temperature changes of each sample and each chamber in WHL II condition

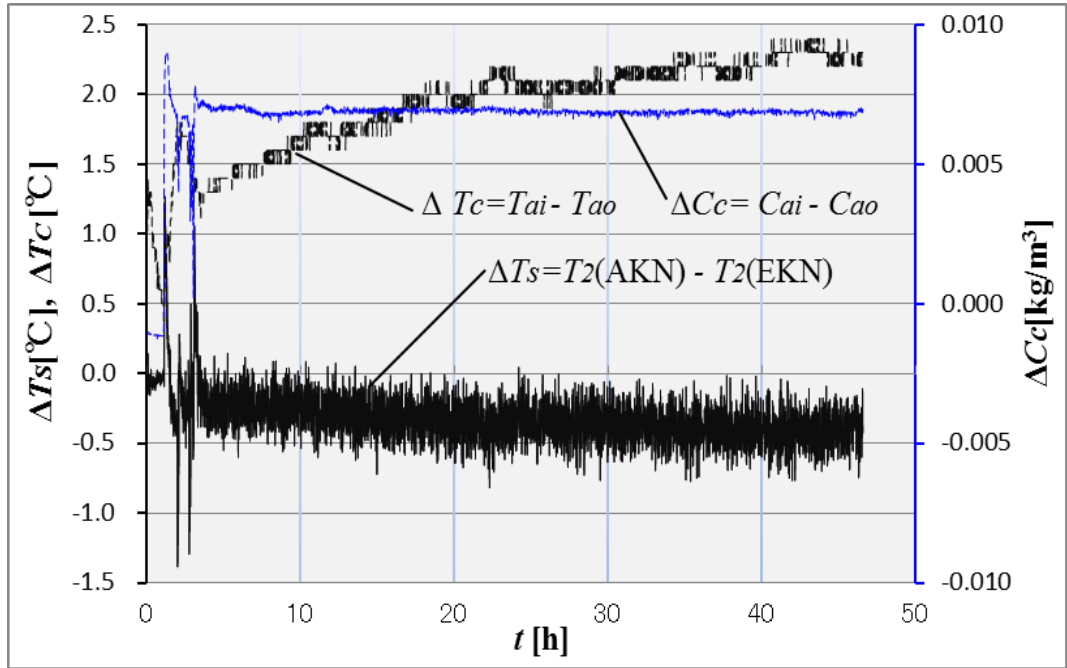


Fig.5.11 Relationship of the temperature/humidity differences between the chambers and the surface temperature differences between AKN and EKN in WHL II condition

#### 5. 3. 4 chamber 間の温湿度差と試料間の温度差との相関関係

DHL 及び WHL I 条件下の chamber 間温度差( $\Delta T_c$ )と試料間温度差( $\Delta T_s$ )の線形近似曲線を Fig.5.12 に示す. 図から chamber 間温度差の増加に比例し試料間温度差が大きくなる傾向を示す. 次に, chamber 間絶対湿度差( $\Delta C_c$ )と試料間温度差( $\Delta T_s$ )の線形近似曲線を Fig.5.13 に示す. 図から chamber 間絶対湿度差の増加に比例し試料間温度差も大きくなる傾向を示す. いずれも  $P < 0.05$  で有意である. これら両グラフより, chamber 間の絶対湿度差が  $0.005 \text{ kg/m}^3$  以下の極めて低い状態では, chamber 間に約  $3.5 \sim 4.0^\circ\text{C}$  の温度差があっても試料間温度差は生じにくく, chamber 間の絶対湿度差が  $0.015 \text{ kg/m}^3$  を上回ると試料間温度差が生じやすくなる傾向を示した.

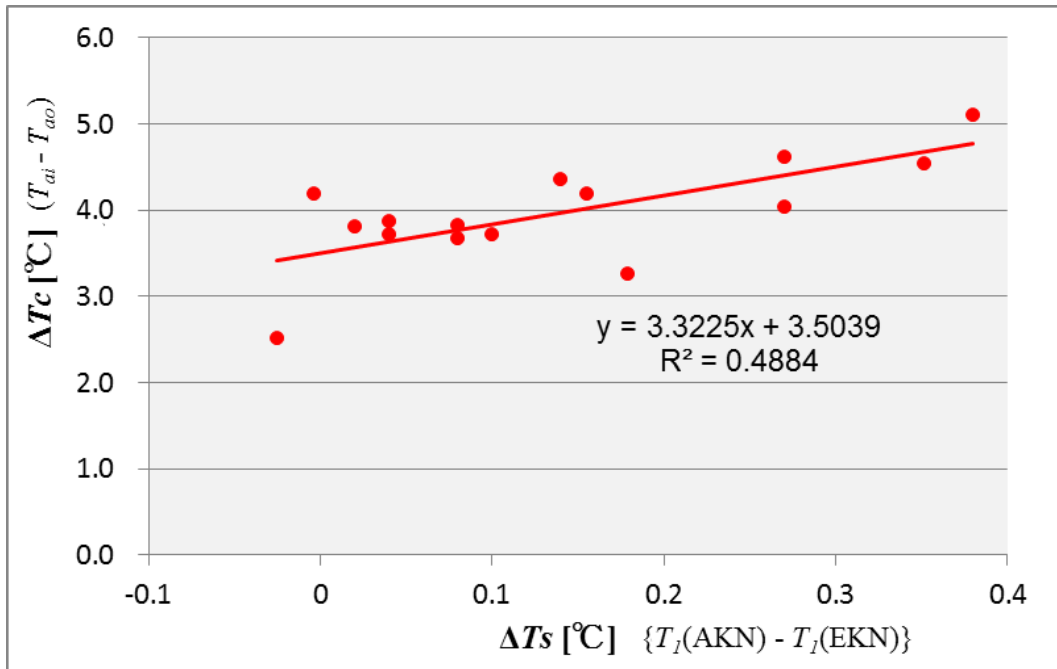


Fig.5.12 The correlation between  $\Delta T_s$  and  $\Delta T_c$

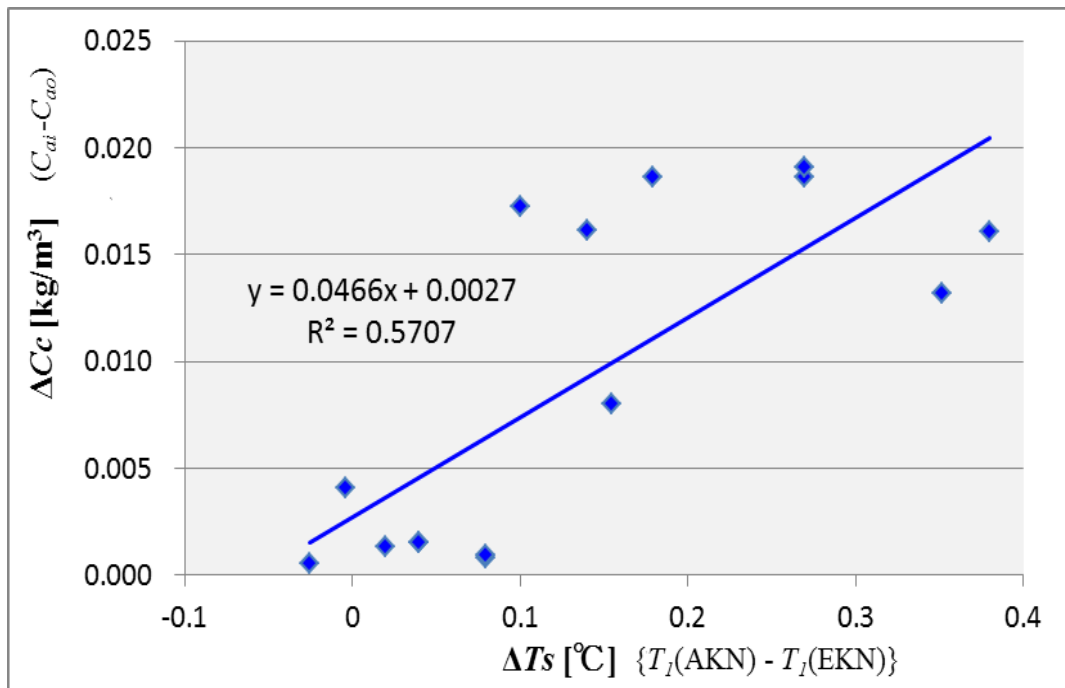


Fig.5.13 The correlation between  $\Delta T_s$  and  $\Delta C_c$



## 5. 4 ニット (AKN と EKN) での数値解析

### 5. 4. 1 数値解析モデル

著者らは文献[5,6]の結果を説明し、そのメカニズムを検討するために、解析モデルを提案し数値解析を試みた。その結果、定性的な傾向を示すことができた[24]。

ここではニットの AKN と EKN とを比較することによって、同様な数値解析的傾向が得られるかどうかを検討する。

数値解析モデルは4章の Fig.4.1 と同様なので、試料層を AKN あるいは EKN と変更すればよい。今回の実験では水分及び熱は、上から下へ移行するので、数値解析モデルを Fig.5.14 のように描き直した。なお、数値計算は、4章で用いた解析プログラムをそのまま使用したが、試料層の各諸物性値、幾何形状、初期条件及び境界条件は、AKN 及び EKN の固有値を使用した。

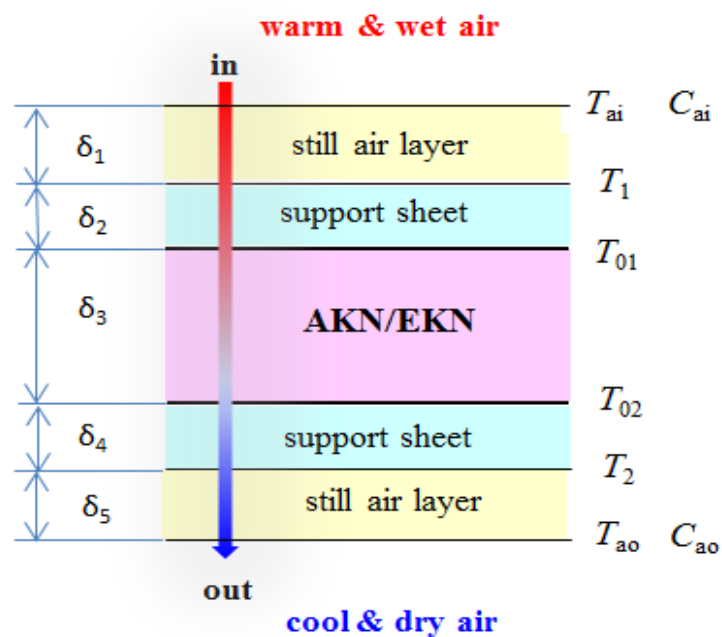


Fig.5.14 Analytical model

#### 5. 4. 2 数値解析結果

数値解析例として、WHL I-1 の 12 時間経過時の条件(Fig.5.15 の縦緑線)を取り上げる。なお、実験は準定常的状态であると見なせるので、初期もこの状態の境界条件であるとして数値解析を行う。

実測から明らかになっている値は、air layer  $\delta_1$  の in 近傍温度  $T_{ai}=30.0^{\circ}\text{C}$ 、support sheet 表面温度  $T_1=28.3^{\circ}\text{C}$ 、air layer  $\delta_5$  の out 近傍温度  $T_{ao}=25.3^{\circ}\text{C}$ 、AKN の厚み、熱伝導率と密度である。次に、air layer の厚み  $\delta_1$  は 5 層構造の定常熱伝導の式より見掛けの厚みを想定した。また、境界空気層の厚み  $\delta_5$  は、WHL II のデータから同様に見掛けの厚みを推定し Table5.6 に示した。また Table5.6 に示した水蒸気の拡散係数は、文献[22]からの値であり、support sheet は実測値、AKN は見かけの拡散係数  $D_{app}$  を用いた。また温度拡散率  $\alpha$  は文献[22]と今回測定 of 熱伝導率、密度、比熱より求め、各層で一定とした。更に、5 層構造の定常熱伝導の式から導いた EKN の各層の温度結果を Table5.7 に示す。

上記条件下の AKN 及び EKN の数値解析結果を Fig.5.16 に示す。図から 2000s 以降の AKN と EKN の差は「 $T_1(\text{AKN}) - T_1(\text{EKN}) \div 0.2^{\circ}\text{C}$ 」となり実測結果とほぼ一致した。なお、 $T_{01}$  及び  $T_{02}$  はそれぞれ air in 及び air out の数値解析による support sheet 内、つまり試料の表面温度となる。また数値解析は、秒単位で表した。

このことは他の経過時の条件 Fig.5.15 とも同様な結果となり、準定常的状态として扱ってよいことも示している。

Table 5.6 Dimensions and thermal properties of each layer

	$\delta$ [m]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]	$D$ [m <sup>2</sup> /s]	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/(kg·K)]
air layer[ $\delta_1$ ]	$8.00 \times 10^{-4}$	$2.212 \times 10^{-5}$	$2.50 \times 10^{-5}$	$2.62 \times 10^{-2}$	1.18	$1.007 \times 10^3$
support sheet	$3.30 \times 10^{-4}$	$1.481 \times 10^{-7}$	$1.70 \times 10^{-7}$	$5.75 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^2$	$1.350 \times 10^3$
AKN	$1.21 \times 10^{-3}$	$3.338 \times 10^{-7}$	$7.00 \times 10^{-7}$	$5.75 \times 10^{-2}$	$1.02 \times 10^2$	$1.360 \times 10^3$
air layer[ $\delta_5$ ]	$5.00 \times 10^{-4}$	$2.212 \times 10^{-5}$	$2.50 \times 10^{-5}$	$2.62 \times 10^{-2}$	1.18	$1.007 \times 10^3$

Table5.7 Calculated temperature and its difference of each layer by

one-dimensional steady-state heat conduction equations of five layers [EKN]

heat flux $q$ [W/m <sup>2</sup> ]	air in $T_{ai}$ [°C]	air layer[ $\delta_1$ ] $\Delta T$ [°C]	$T_1$ [°C]	support sheet[ $\delta_2$ ] $\Delta T$ [°C]	$T_{01}$ [°C]
57.2	30.0	1.7	28.3	0.33	27.9

EKN[ $\delta_3$ ] $\Delta T$ [°C]	$T_{02}$ [°C]	support sheet[ $\delta_4$ ] $\Delta T$ [°C]	$T_2$ [°C]	air layer[ $\delta_5$ ] $\Delta T$ [°C]	air out $T_{ao}$ [°C]
1.20	26.7	0.33	26.4	1.1	25.3

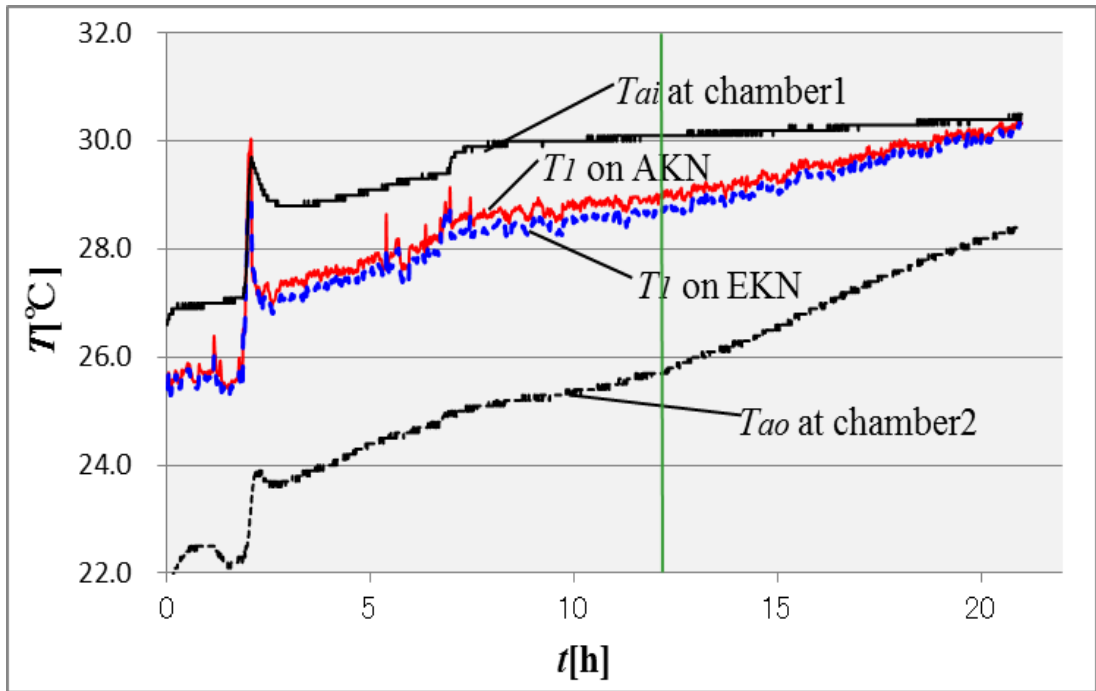


Fig.5.15 Temperature changes of each sample and each chamber in WHL I condition

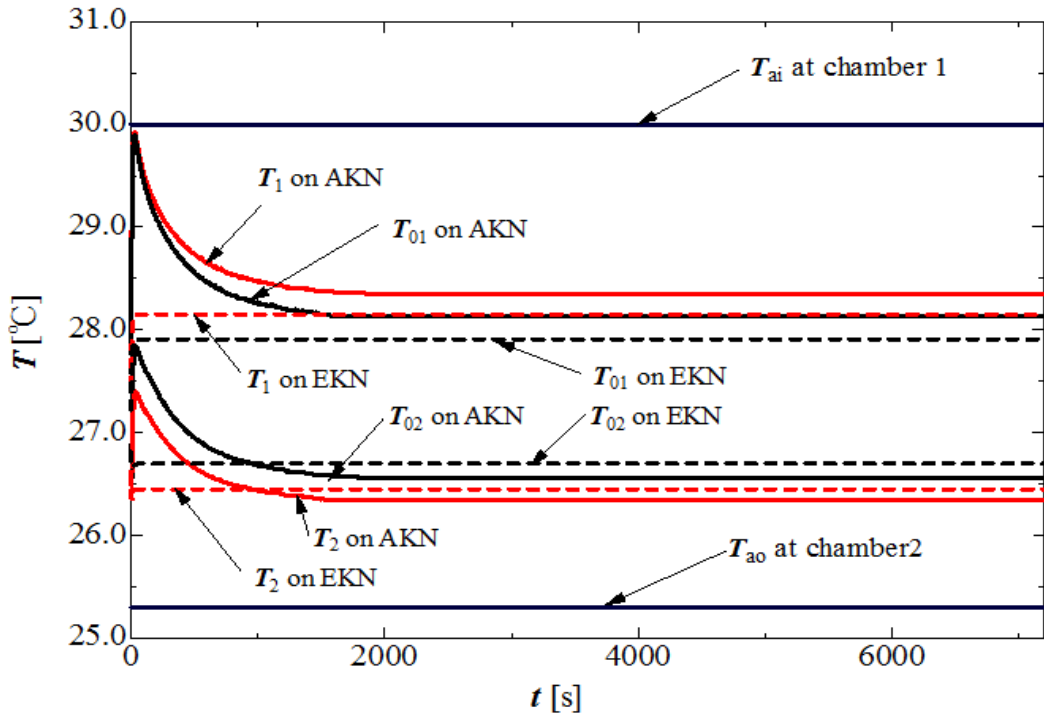


Fig.5.16 An example of numerical results of temperature change

$T_1$  and  $T_2$  in the case of WHL I condition

## 5. 5 考察

準定常状態において、吸放湿性を有する素材の僅かな温度上昇や試料間表裏の温度差の推移は、保温性の差を示していると考えられる。この保温性の差は、chamber間の湿度差が少ないケース(DHL)においては生じにくく、一定の湿度差と温度差を有する条件下で現れる事が示された。WHL Iのケースでは、試料間温度差は、 $AKN > EKN$ となり有意な相関性も確認された。この現象は、相対湿度の上昇に比例しAKNの熱伝導率が大きくなる事と矛盾する。一方、WHL IIのケースでは、n数は少ないが、試料間温度差は、 $AKN < EKN$ となった。

このことから AKN を介する両界面では、準定常的状态にあるにも関わらず、常に水分の吸脱着に伴う吸脱着熱が生じ、保温性に影響を与えているのではないかと推察される。

つまり温湿度の高い側では僅かに吸着熱で温度上昇が、温湿度の低い側では脱着熱で温度降下が継続している「動的平衡状態」にあると考えられる。条件的な制約はあるが、この結果は、吸着熱が、定常的状态においても保温性の向上に繋がる可能性を示すものである。また、数値解析モデルに基づく AKN の解析結果例から、初期の温度上昇と定常時付近の試料表裏の温度差の増加が示され、実験結果の傾向と一致した。

しかし、今回の WHL I の chamber2 の湿度条件は、極めて低くやや極端な例である。例えば、絶対湿度の高い領域での比較実験を仮定すれば、水分による熱伝導率の影響も大きくなり、吸着熱の効果は相対的に減少すると考えられる。よって、数値解析においては今後、熱伝導率を組み込んだ分析も検討していきたいと考えている。

第1章では、今回の研究内容の目的と概要を説明した。

第2章の前半では、吸放湿繊維材料の原綿（AF-Na）を50%配合した不織布及び30%配合したニットの熱伝導率を計測した。

この不織布及びニットは、相対湿度変化に伴う水分率の増加によって、熱伝導率も大きくなる。このことは、高湿度領域では、保温性の低下が生じることを意味する。一方、吸放湿性を有さないポリエステル繊維から成る不織布及びニットは、相対湿度変化に伴う水分率の影響をほとんど受けず、熱伝導率の変化は見られなかった。このことから、高湿度領域では、吸放湿性を有する繊維の方が、吸放湿性を有さない繊維に比べ、熱伝導率の増加による保温性の低下が示された。

次に、AF-Na 100%からなる原綿の相対湿度変化に伴う水分吸脱着による吸脱着熱量を計測した。この吸脱着熱量の値は、第4章で述べる数値計算のパラメータとして利用した。第2章の後半は、繊維構造論の見地からの実験的研究である。

AF-Naの吸脱着熱を支配する官能基当りの吸脱着熱を試算した。その結果、両官能基の吸脱着熱は、水分の凝縮熱や気化熱よりも高いエネルギー値を示した。

更に高湿度領域での吸脱着熱の方が、低湿度領域での吸脱着熱よりも低くなる傾向が示された。この傾向は、官能基と水分子の結合状態が、「結合水的状態」→「半結合水的状態」→「自由水的状態」と変化し分子間結合力が低下した為と考えられる。

吸脱着熱から水分の凝縮熱あるいは気化熱を差引いた残りのエネルギーは、水素結合由来のエネルギーになるのではないかと推察される。この値は、文献[15]との比較においても、妥当な範囲と考えられる。

第3章の実験的研究では、Dry Heat Loss(以後 DHL と称する)条件下における吸放湿繊維材料と吸放湿を有さない繊維材料の表裏温度には、ほとんど差が見られなかった。この結果は、第2章の、湿度の低い環境下の熱伝導率とも一致し、熱流速の一次元性を確認した。しかし、Wet Heat Loss(以後 WHL と称する)条件下の定常的状态における吸放湿繊維材料と吸放湿を有さない繊維材料の表裏温度差は、常に吸放湿繊維材料の方が大き

くなった。この試料の表裏温度差や試料間温度差は、保温性の差を現していると考えられ、第2章の相対湿度が比較的高い条件下の熱伝導性の結果と矛盾した。よって、この矛盾が、如何なるメカニズムによって誘発されているか、第4章、第5章で検証した。

第4章では、第3章の WHL 条件下における保温性の増加に関する説明とそのメカニズムを検討するために、妥当な解析モデルを提案し数値解析を試みた。

非定常熱伝導と非定常水蒸気拡散を連成する解析プログラムにおいて、試料内部で吸着平衡になっても、試料表裏では吸着平衡には達しないと仮定した。

この数値解析モデルに基づく結果は、初期の温度上昇及び定常的状态の試料表裏の温度挙動が、実験結果の傾向と一致することが示された。これは定常的状态における吸放湿繊維材料の温度上昇あるいは温度差の増加の要因及びメカニズム解明の一例とすることができ、定性的な傾向を示すことができた。

しかし、今回の数値解析モデルでは、空気層を厚みのある静止空気層としたことや、水分による熱伝導率の増加は考慮していない。

よって今後、通気及び熱伝導率の細かな条件変化に対応できる解析モデルを創り、実測値との相関性を高めていく予定である。

また、定量的な議論ができるように熱物性値、パラメータ値の再検討を加え、衣服設計への応用を確立する予定である。

第5章の可視化実験においては、長時間に渡って試料間温度差の持続が確認された。この試料間温度差は、保温性の差を現している。

つまり、温湿度の高い側では、僅かに水分吸着に伴う吸着熱で温度上昇が、温湿度の低い側では、僅かに水分脱着に伴う脱着熱で、温度降下が継続している、「動的平衡状態にある」と考えられる。

よって、条件的な制約はあるが、この現象は、吸着熱が、準定常的状态[4]においても、保温性の向上に繋がる可能性を示唆するものである。

そこで一つの仮定として、寒冷下での吸湿発熱素材を使用した衣服着用に適応すれば以下の事が考えられる。

人体の体幹からは常に水蒸気（不感蒸泄）が発生しており、寒冷条件下では、外気へと連続的に水分が放湿される。よって、衣服内外では、今回のような準定常的状态が形

成されやすく，吸湿発熱効果による保温性の向上が期待される。

しかし，今回の実験での湿度条件は，極めて低くやや極端な例である．例えば，実用的な領域での比較実験を仮定すれば，水分による熱伝導性の影響も大きくなり，吸着熱の効果は相対的に減少すると考えられる．よって，今後，吸脱着熱と熱伝導率及び通気を取り込んだ課題についての検討を加えていく予定である．

第6章では本論文のまとめを行った。

最後に本研究「吸放湿繊維材料内の水蒸気及び熱移動に関する研究」は繊維の保温性に関する繊維科学と伝熱学の境界領域の新しい研究課題であり，今回の到達点はその足掛かり的な成果とも云える．今後この分野でのさらに精緻な研究が進み，その後の研究開発の第一歩となればと期待する．



## 謝 辞

本研究に当り，多大なご指導とご教授を賜りました福岡工業大学・工学部・知能機械工学科教授の田中宏史先生並びに田中研究室の卒業生の方々に心より謝意を表します．

また，福岡工業大学とミズノ（株）との橋渡しをして頂き，研究フォローを授かりました福岡工業大学名誉教授の溝田武人先生に併せて御礼申し上げます．

さらには，福岡工業大学教授の河村良行先生，倪 宝栄先生，赤木文男先生には様々なご教示をいただきました．心より謝意を表します．

一方，ミズノ（株）におきましても，本研究の重要性を理解頂き，推進できる機会を創って頂いたミズノ（株）研究開発部 取締役の樋口良司様，部長の加藤祐介様，並びに同僚で福岡工業大学博士号取得の鳴尾丈司様に謝意を表します．

## 参考文献

- [1] Nakayama A., Thermophysiology,p135,(in Japanese)
- [2] 田村照子, 小柴朋子, 平田耕造, 衣の科学シリーズ-衣環境の科学(2004)p30
- [3]Ogino T., The Society of Fiber Science and Technology, Japan,57(2001)p320  
(in Japanese)
- [4] Fujii T., “Progress in Heat Transfer Vol. 3”, Yokendo, Tokyo, p.6-7(1974).  
(in Japanese)
- [5] Ogino T., and Tanaka H., Japan. S. Mechanical Engineers No.128-3, p.123-124(2012).  
(in Japanese)
- [6] Ogino T., and Tanaka H., Japan Thermophysical Properties, 33, p.188-190(2012).  
(in Japanese).
- [7] Ogino T., and Tanaka H., Japan Proceeding of Thermal Engineering Conference, 12, p.403-404(2012). (in Japanese)
- [8] Matsumoto K., JOURNAL OF THE TEXTILE MACHINERY SOCIETY OF JAPAN Vol.52,  
No.7,July(1999)37-44 (in Japanese)
- [9] Matsumoto K., JOURNAL OF THE TEXTILE MACHINERY SOCIETY OF JAPAN Vol.52,  
No.8,Aug.(1999)43-48 (in Japanese)
- [10]Ogino T., and Tanaka H., Japan Journal of Thermophysical Properties,Vol.28, No.2,p89-93(2014).(in Japanese)
- [11]Ogino T., and Tanaka H., Japan Thermophysical Properties,34, p.229-231(2013) (in Japanese)
- [12][http://www.keskato.co.jp/products/files/10008\\_file3.pdf](http://www.keskato.co.jp/products/files/10008_file3.pdf)

- [13] [http:// www. setaram com/C80-Cells.htm](http://www.setaram.com/C80-Cells.htm)
- [14]SPSJ, “Polymer and Water”, Kyoritsu Shuppan Co.,Ltd. p.220-221 (1995). (in Japanese)
- [15] 接着ハンドブック(第2版)日本接着協会(1982)
- [16] Ogino T., and Tanaka H., *The Society of Fiber Science and Technology, Japan*,Vol.70, No.7,p160-166(2014).(in Japanese)
- [17] 新編熱物性ハンドブック p552, 日本熱物性学会編(2008)
- [18]Tanaka H., Proc. of the 3rd ASME-JSME Thermal Engng. Conf. RENO NEVADA, Vol.3,p.489-494 (1991).
- [19] Tanaka H., et. al., Trans. of SHASEJ, No.59, p.41-47(1995)
- [20] Tanaka H., et. al., Trans. of SHASEJ, No.71, p.13-17(1998)
- .
- [21] 日本熱物性学会編, 新編熱物性ハンドブック, 養賢堂,2008.
- [22] JSME, “Data Book: Thermophysical Properties of Fluid”(1983) (in Japanese).
- [23]Ogino T., and Tanaka H., Japan Thermophysical Properties,34, p.229-231(2013)  
(in Japanese)
- [24]Ogino T., and Tanaka H., Japan Journal of Thermophysical Properties,Vol.28, No.2,p89-93(2014).(in Japanese)