

衣類の乾燥過程における熱・水分複合移動モデルの開発に関する研究

三浦 佑介

1. はじめに

近年、ライフスタイルや天候、花粉、PM2.5などの要因から洗濯物を室内で乾燥させる家庭が増えている。しかし、配慮なく単に室内干しを行った場合、洗濯物から発生する水蒸気の影響で室内湿度が上昇するため、乾くのに時間がかかる、結露が発生するなどの問題が考えられる。また、室内での衣類の乾燥は空気の温度、湿度、ヒータがある場合はその入力、換気風量、衣類の質量、室の大きさや断熱構造など多くの因子に影響されるため数値シミュレーションによる衣類乾燥性能の評価が必要になってくる。

衣類の乾燥過程における放湿量に関して数値計算を行う場合、水分の移動に関して簡易的な計算が多く、熱の移動においても深く考慮されていない。乾燥室内の湿熱環境や熱負荷の解析のためにはより正確な衣類の放湿量や熱の移動の算定が必要である。

本研究では、乾燥過程における衣類の湿流現象および衣類の物性値を把握することを目的とし、恒温恒湿実験室を用いて衣類の放湿に関する実験を行う。さらに、熱と水分の移動を考慮した衣類乾燥モデルを用いてより詳細な数値計算を行い、衣類の含水量および表面温度の再現性を検証する。

2. 衣類乾燥モデルの比較

2.1 絶対湿度を駆動力とした衣類乾燥モデル

絶対湿度を駆動力とした衣類乾燥モデルは出端らの数理モデル¹⁾を参考にしている。衣類の厚みは薄いため、衣類の湿流を無視し、衣類に含まれる水分は全て衣類表面に付着していると仮定すると、衣類の放湿量は式(1)で求められる。

$$J = A_{cl} \alpha'_x (X_{cl} - X_{in}) \varepsilon \quad (1)$$

ここで、乾いていない部分の面積は気乾状態からの水分重量の差に比例するものと仮定し、衣類の含水面積比率を式(2)により算出する。気乾状態の水分重量は衣類絶対乾重量と平衡含水率より求められる(式(3))。

$$\varepsilon = (M_w - M_{w,e}) / (M_{w,i} - M_{w,e}) \quad (2)$$

$$M_{w,e} = M_{dry} W_e \quad (3)$$

衣類の温度が室内温度と等しいと仮定すると、衣類と室内の絶対湿度の差は室温で飽和状態の絶対湿度を用いて式(4)のように表される。

$$X_{cl} - X_{in} = X_{in}^0 - X_{in} \quad (4)$$

2.2 水分ポテンシャルを駆動力とした衣類乾燥モデル

図1に水分ポテンシャル線図²⁾を示す。水分ポテンシャルとは、水蒸気濃度、水蒸気分子の内部エネルギー、水蒸気分子に作用する力(毛管吸着力)、場のエネルギー(外力等の応力)などを関数とする非平衡熱力学エネルギーであり、物質平衡の指標となる化学ポテンシャル³⁾を水分に応用したものである。水分ポテンシャルは、飽和水分ポテンシャルと不飽和水分ポテンシャルの和で求められるが、飽和時、不飽和水分ポテンシャルは考えず飽和水分ポテンシャルのみで与えられる。

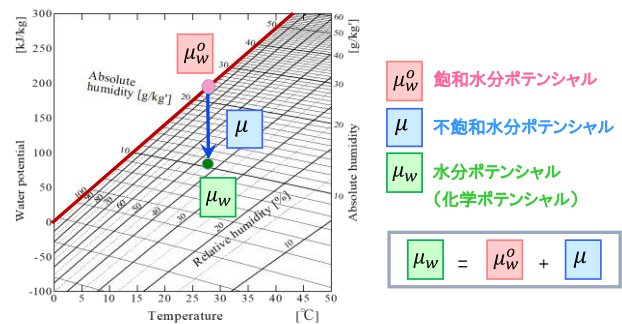


図1 水分ポテンシャル線図

衣類の水分ポテンシャルの算出のために、衣類の温度を求める必要がある。湿潤状態の衣類の熱収支式は式(6)である。ここで、衣類の見かけの熱容量 $\bar{c}p$ は式(5)で表される。式(6)右辺第1項は空気から衣類へ伝わった熱量、第2項は衣類からの放湿によって奪われる熱量である。前時刻の放湿量を用いると式(6)は衣類の温度を未知数とする方程式となる。

$$\bar{c}p = M_{cl} C_{cl} + M_w C_w \quad (5)$$

$$\bar{c}p \frac{\partial T_{cl}}{\partial t} = A_{cl} \alpha_c (T_{in} - T_{cl}) - l_w J \quad (6)$$

水分ポテンシャルを湿流の駆動力とする場合、衣類の含水状況の区別を行い放湿量の計算をする。衣類の表面が十分に濡れていれば、一定の条件下における衣類からの水分蒸発速度は、同一条件での自由表面からの蒸発速度に等しく、この乾燥状態を一般に恒率乾燥と呼ぶ。これに対し、乾燥が進み、衣類の保有する水分が少なくなると、衣類の乾燥速度が減少し、この乾燥状態を減率乾燥とする。さらに、恒率乾燥と減率乾燥の境界となる含水率を限界含水率と呼ぶ⁴⁾。以下にそれぞれの乾燥状態での放湿量の計算を示す。

(a)恒率乾燥域

恒率乾燥域では、衣類表面からの自由水の蒸発のみを考え、放湿量を算出する。恒率乾燥では衣類は過飽和状態であるため衣類の水分ポテンシャルは衣類の飽和水分ポテンシャルのみで考えることができる。放湿量は式(7)により算出する。

$$J = A_{cl} \alpha'_w (\mu_{w,cl} - \mu_{w,in})$$

$$= A_{cl} \alpha'_w (\mu_{w,cl}^0 - \mu_{w,in}) \quad (7)$$

(b)減率乾燥域

減率乾燥域では、衣類の不飽和水分ポテンシャルは未知数であり、式(8)の水分収支式によって算出する。ここで、 $\partial\phi/\partial\mu$ は材料の吸放湿の程度を表す水分容量であり、平衡含水率曲線の傾きにより求める。不飽和水分ポテンシャルをもとに水分ポテンシャルも算出することができ、式(9)によって放湿量を算出する。

$$\frac{\partial\phi}{\partial\mu_{cl}} \cdot \frac{\partial\mu_{cl}}{\partial t} = \frac{A_{cl}}{M_{dry}} \alpha'_w (\mu_{w,cl} - \mu_{w,in}) \quad (8)$$

$$J = A_{cl} \alpha'_w (\mu_{w,cl} - \mu_{w,in}) \quad (9)$$

ここで、上述した計算は衣類の厚みを無視したものであったが、衣類の厚みを考慮する場合、先に乾燥した衣類表面が衣類内部からの放湿の抵抗となり、計算と実測に無視できない差が生じることが考えられる。そこで、飽和時から気乾状態までの衣類中水分の割合を蒸発比とし、式(10)で算出し、見かけの水分伝達率を式(11)の値とすることで、水分抵抗を考慮する。

$$\varepsilon' = (M_w - M_{w,e}) / (M_w^0 - M_{w,e}) \quad (10)$$

$$\overline{\alpha'_w} = \alpha'_w \cdot \varepsilon' \quad (11)$$

3. 衣類の放湿に関する実験

3.1 衣類の乾燥速度に関する実験 (実験 1)

本実験では、衣類の湿流に関する物性値を把握することを目的とし、九州大学の所有する恒温恒湿実験室を使用して衣類の放湿現象に関する計測を行う。また、計測によって得られた結果と前章で示した衣類乾燥モデルによる計算結果の比較から、各モデルの精度を検証する。

表 1 に計測概要、表 2 に試験体概要を示す。使用した試験体は主に医療施設で使われる寝具用の衣類である。実験室内を温度 40°C、相対湿度 40% に設定する。実験室内の温湿度が条件の値に達してから 30 分以上養生をした後計測を開始し、衣類重量の変化が一定となるまで行う。試験体は、十分に濡らした後、家庭用洗濯機で脱水を行い、計測開始まで袋に入れ、密閉しておく。表面温度は衣類の中心にアルミテープで熱電対を張り付けることで測定する。衣類は幅 50cm で短辺をつまみ両面が空気に触れた状態で計測を行う。敷布団用シーツと包布に関しては表面積が大きく干し方によってしわの程度が異なるため、他に 50cm 以上に広げ、しわをなくし、十分に空気に触れている状態の計測も行った。

表 1 計測概要 (実験 1)

項目	概要	
計測対象	建築環境シミュレータ 屋外実験室	
温湿度設定	温度40°C, 相対湿度40%	
計測間隔	5秒	
計測機器	空気温湿度	温湿度センサー CHINO : MD8002-N00
	表面温度	温湿度センサー espec : TR-72wb
		温度センサー espec : TR-75wb
	衣類重量	電子天秤 OHAUS : NVT16000/2
計測項目	空気温湿度	実験室内中心位置 (高さ1.5m)
	表面温度	衣類中心点
	衣類重量	物干し台下部 (2台)

表 2 試験体概要

衣類名称	構成材料	長辺	短辺	
防水シートA	防水部分	1.40m	0.84m	
				: 表ポリエステル100%
				: 裏ポリウレタン100%
	パイアステープ		: ポリエステル100%	
防水シートB	防水部分	1.40m	0.84m	
				: 表ポリエステル100%
				: 裏ポリウレタン100%
	パイアステープ		: ポリエステル100%	
防水シートC	表	1.40m	0.90m	
	中			: 綿80% / ポリエステル20%
	裏			: ポリウレタン100%
防水シートD	表	1.45m	0.90m	
	中			: ポリエステル100%
	裏			: ポリウレタン100%
マットレスカバーA	ポリエステル100%	1.40m	0.83m	
マットレスカバーB	表	1.40m	0.83m	
	裏			: ポリエステル100%
マットレスカバーC	表	1.40m	0.83m	
	裏			: ポリウレタン100%
敷布団用シーツ	ポリエステル100%	1.80m	1.37m	
包布	ポリエステル100%	1.30m	1.35m	
枕	側生地	0.32m	0.43m	
	中 材			: 低密度ポリエチレン

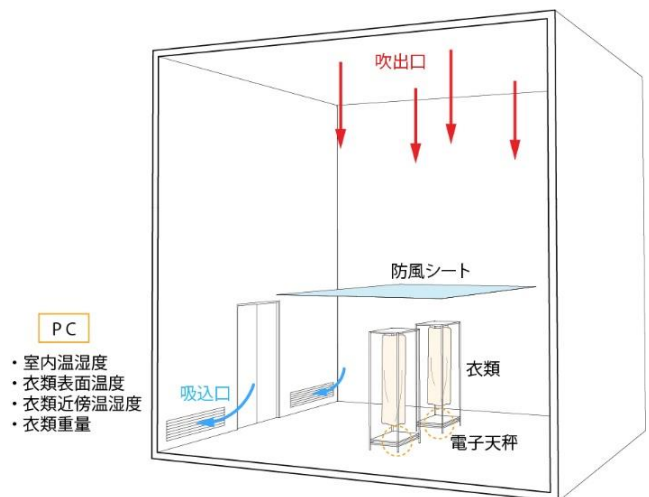


図 2 衣類の乾燥速度に関する実験のイメージ図

3.2 衣類の平衡含水率に関する実験 (実験 2)

本実験は衣類の平衡含水量を計測し衣類ごとの含水率曲線を作成することで、衣類の水分容量および限界含水率を把握することを目的とする。

表3 計測概要 (実験2)

項目	概要
温度条件	25°C
試験体の大きさ	2.5cm×2.5cm
計測機器	不飽和水分ポテンシャル
	水分ポテンシャル測定装置 WP4-T
	電子水分計
	重量
	ザルトリウス：MA100

表3に計測の概要を示す。水分ポテンシャル測定装置で試験体の平衡状態の不飽和水分ポテンシャルを測定し、ただちに電子水分計で試験体の含水量を計測する。上記の測定を1つの試験体に対して10回以上行う。実験により求めた不飽和水分ポテンシャルと重量含水率の関係から最小二乗法により近似曲線を作成し、これを平衡含水率曲線とした。

4. 衣類乾燥モデルの精度検証

4.1 物性値の決定

表4に衣類条件を示す。衣類乾燥の数値計算の入力値として必要な衣類の物性値を算出する。衣類の表面積、初期(湿潤)重量、絶乾重量は衣類の乾燥速度に関する実験で計測した値を用いる。衣類の比熱は衣類構成材料の比熱と組成割合から決定する。表5に実験により算出した物性値を示す。対流熱伝達率、水分伝達率を衣類の乾燥速度に関する実験の結果より同定した。水分伝達率は、絶対湿度の差を湿流の駆動力とした場合と、水分ポテンシャルの差を湿流の駆動力とした場合のそれぞれに関して算出した。限界含水率は実験で求めた平衡含水率曲線より、不飽和水分ポテンシャルが0の時の含水率とした。

表4 計測した物性値

衣類名称	表面積 [m ²]	初期(湿潤)重量 [kg]	絶乾重量 [kg]	比熱 [J/g・K]
防水シートA	2.35	0.491	0.275	1.42
防水シートB	2.35	0.493	0.386	1.42
防水シートC	2.52	0.616	0.355	1.41
防水シートD	2.62	0.43	0.246	1.30
マットレスカバーA	2.32	0.877	0.733	1.05
マットレスカバーB	2.32	1.179	0.849	1.42
マットレスカバーC	2.32	1.302	0.870	1.42
敷布団用シート (しわあり)	4.94	0.67	0.504	1.05
敷布団用シート (しわなし)	4.94	0.685	0.504	1.05
包布 (しわあり)	3.51	0.715	0.594	1.05
包布 (しわなし)	3.51	0.722	0.594	1.05
枕	0.28	0.116	0.092	1.05

表5 計測した物性値

衣類名称	水分伝達率 [g/(m ² ・s)・(g/kg)]	[g/(m ² ・s)・(kJ/kg)]	対流熱伝達率 [W/(m ² ・K)]	限界含水率 [kg/kg]
防水シートA	2.31E-03	3.54E-04	9.51	0.241
防水シートB	2.23E-03	3.27E-04	7.73	0.134
防水シートC	3.26E-03	4.18E-04	7.14	0.317
防水シートD	3.66E-03	4.57E-04	7.33	0.245
マットレスカバーA	3.33E-03	4.48E-04	8.43	0.120
マットレスカバーB	4.30E-03	5.36E-04	8.61	0.098
マットレスカバーC	1.19E-03	2.14E-04	10.62	0.030
敷布団用シート (しわあり)	2.58E-03	2.99E-04	4.19	0.172
敷布団用シート (しわなし)	2.92E-03	3.82E-04	6.79	0.172
包布 (しわあり)	3.05E-03	3.75E-04	5.85	0.163
包布 (しわなし)	3.63E-03	4.71E-04	8.21	0.163
枕	4.78E-03	6.53E-04	12.79	0.034

4.2 計算条件

計算を行う衣類乾燥モデルを表6にまとめる。衣類が十分に乾燥するまで計算を行った。

表6 検証項目

簡易モデル	絶対湿度を湿流の駆動力とする。
詳細モデル (水分抵抗考慮なし)	水分ポテンシャルを湿流の駆動力とする。
詳細モデル (水分抵抗考慮あり)	水分ポテンシャルを湿流の駆動力とする。水分抵抗を考慮して水分伝達率を補正する。

4.3 実験値結果及び計算結果の検討

図6に、衣類の含水量と温度の計算結果と実測値の比較を示す。簡易モデルに関しては衣類温度の算出を行っていないため詳細モデルおよび実験値の結果のみを示す。なお、衣類構成材料が類似している衣類に関しては結果を省略した。以下それぞれの結果と考察を示す。

実験の結果では放湿量が一定である恒率乾燥域と放湿量が小さくなっていく減率乾燥域が確認できた。また温度が上昇を始める時間と衣類の放湿量が減少を始める時間は概ね一致している。これは、恒率乾燥時には衣類からの蒸発潜熱と空気から衣類に伝わる熱が釣り合っていたため温度が変化しないが、減率乾燥では蒸発量が減り蒸発潜熱が小さくなるため釣り合いが取れなくなり温度が上昇したと考察できる。防水シートCは衣類温度変化が段階的である。これは、防水シートCが3層構造であり、衣類表面と衣類内部で乾燥速度が異なったことが要因であると考えられる。

簡易モデルは実験値と大きく差がある。簡易モデルは衣類の恒率乾燥域と減率乾燥域の区別を行わずに、放湿量の計算を行っているためだと考えられる。また、衣類温度を室内温度と等しいと仮定して計算を行っているが、実験結果より湿潤状態の衣類の表面温度は空間の温度より小さい値となっていることがわかり、計算値と実験値のずれの要因となったと考えられる。

水分抵抗を考慮しない詳細モデルは、含水量の計算で、恒率乾燥域は概ね実験値と一致している。しかし、減率乾燥域では含水量の変化が実験値を追従することができていない。これは、実験では重力や衣類の厚みなどの影響で衣類の水分に分布が生じており、放湿現象が一様ではないためだと考えられる。

水分抵抗を考慮した詳細モデルの含水量の経時変化は実験値と概ね一致し、より精度の良い計算ができています。これは、衣類の厚みを考慮して、水分伝達率を補正したことで、より実現象に近い計算となったためだと考えられる。また、衣類温度の計算においては敷布団用シートのように温度の上昇が実験値の勾配と異なるものがみられた。これは、計算値では衣類の温度は全て一様なものとして算出しているのに対し、計測値は衣類の中心点を計測した局所的

なものであることが要因であると考えられる。また、計測に使用したアルミテープが温度計測点付近の放湿現象に時間的遅れを発生させたため、計算値と実測値の温度のずれの要因となったと考えられる。

5. 結び

本研究では、水分ポテンシャルを湿流の駆動力とすることで、熱と水分の複合移動を考慮したより詳細な衣類の乾燥モデルを開発した。実験では乾燥過程における衣類の湿流現象および衣類の物性値を把握した。絶対湿度と水分ポテンシャルの2通りの駆動力の衣類乾燥モデルと比較し、精度検証を行った。水分ポテンシャルを駆動力とするモデルでは減率乾燥時の水分抵抗を考慮することでより実現象に近い計算を行うことができた。今後は、開発した衣類乾燥モデルによって再現される熱・水分の移動が建築物の温熱環境にどのような影響を与えるのか検討を進めることが課題である。

参考文献

- 1) 出端祐輔ほか: 実測に基づく室内干し時における洗濯物の乾燥時間および室内温湿度環境, 日本建築学会近畿支部報告 2010.6
- 2) 尾崎明仁, 渡邊俊行ほか: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析—湿流の駆動力, 日本建築学会計画系論文集, 第488号, pp.17-24, 1996.10
- 3) 小出昭一郎: 基礎物理学2 熱学, 東京大学出版会, 1993
- 4) 福田光男, 他: 浴室用衣類乾燥機の性能シミュレーションと実験, 空気調和・衛生工学会論文集, No.86, 2002.7

【記号】

J : 放湿量[g/s], α'_x : 水分伝達率[g/(m²·s(g/kg'))], X : 絶対湿度[g/kg]
 A : 表面積[m²], M : 重量[g], w : 含水率[-], ε : 含水面積比率[-], T : 温度[K]
 C : 比熱[J/(kg·K)], c_p : 熱容量[J/K], t : 時間[s], l : 蒸発潜熱[J/g]
 α_c : 対流熱伝達率[W/(m²·K)], ε' : 蒸発比[-], μ_w : 水分ポテンシャル[kJ/kg]
 μ_w^0 : 飽和水分ポテンシャル[kJ/kg], μ : 不飽和水分ポテンシャル[kJ/kg]
 α'_w : 水分伝達率[g/(m²·s·kJ/kg)], $\partial\theta/\partial\mu$: 水分容量[(g/g)/(kJ/kg)]

【添字】

in : 室内空気, cl : 衣類, dry : 絶乾時, e : 気乾状態, W : 水, i : 初期状態

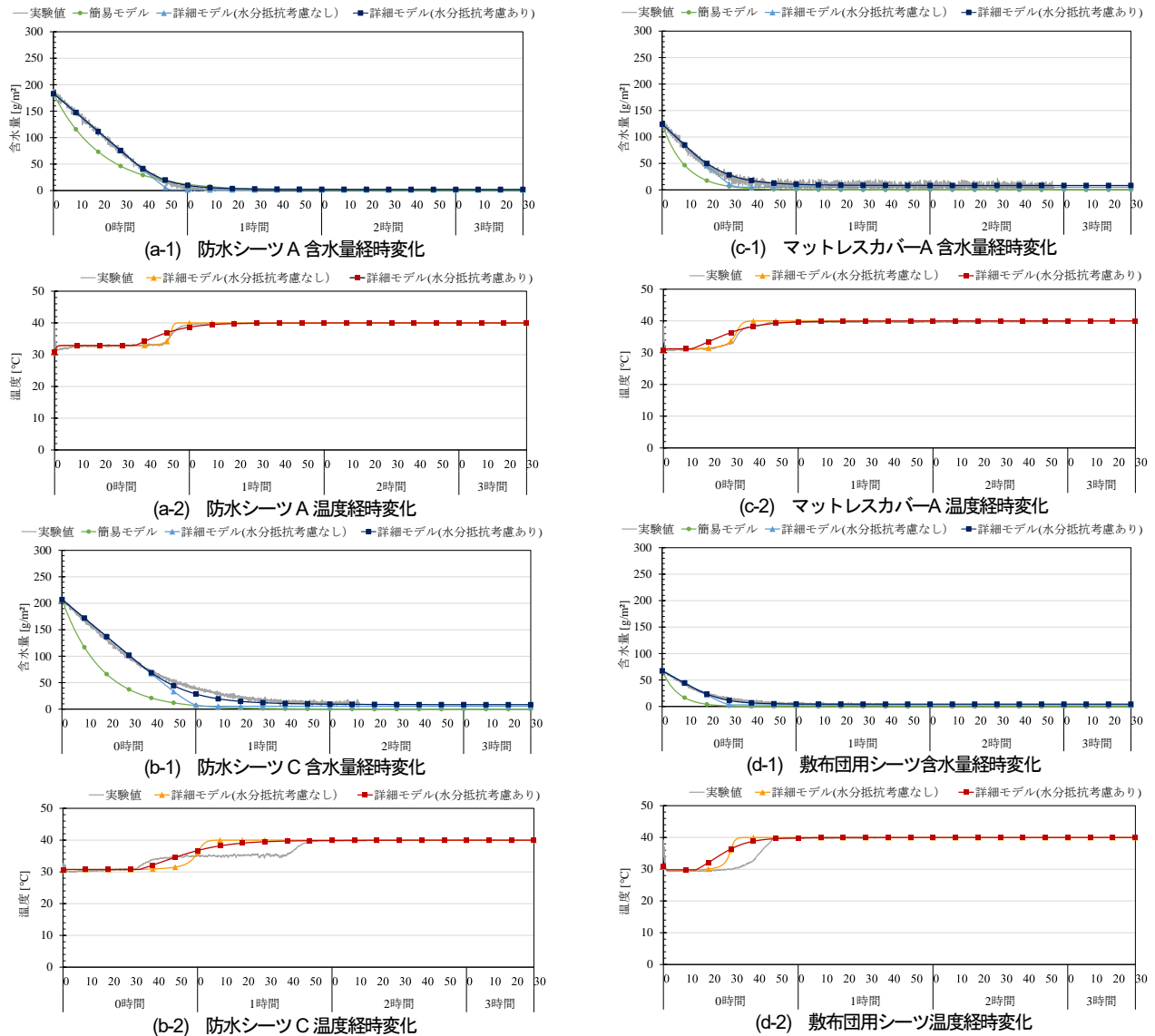


図3 実験結果及び計算結果の比較