

被服材料の保温性の研究

その12 保温性測定系における温度変化曲線の理論的考察

寺 岡 宏 若 山 初 子

前報までの実験において保温性測定のための種々の実験系を設定し、この系における保温性を各種の被服材料について測定した。またそれらの結果にもとづいて、保温性を規定する諸要因についての考察を行なってきた。その結果、布の保温性には熱貫流の阻害効果の要因と、布自体の熱容量的な要因との二つの要素が作用し、その相互作用の結果として保温性が規定されることが明らかにされた。

これらの要因を更に詳細に解明することを目的として、本実験においては新しい実験系を設定した。この系の特徴は、高温放熱系から低温系への熱移動の経路に実験材料を設置し、熱移動速度の変化を観察しようとするものである。このため高温放熱系の温度、放熱面を実験材料で覆うことによって作られる薄層空間の温度、低温系の中の実験材料と近接する空間の温度、および低温系の中心点を占めほぼ低温系空間の平均的値を示すと見なされる点の温度、以上四点の温度変化を同時平行的に測定しようとするものである。

今回の実験ではそのうち特に高温放熱面と、実験材料との間に作られる薄層空間の温度変化を記録し、この値と実験系のモデルにもとづいて計算された理論値との比較を行なった。この理論値と実験値の一致をもとに、本実験系における布の保温性を構成する諸要因を定量的に規定することができた。

材 料 と 方 法

材 料

本論文に用いた布地を表1に示す。実験に用いたガラス容器に合うようにカットし、これを25°Cの恒温器で乾燥させた後使用した。

表1 実験に用いた布地

織 維 名	ア ク リ ル
生 地 名	ジ ャ ー ジ
組 織	た て メ リ ャ ス
厚 さ (mm)	1.14~1.21

方 法

図1のような高温放熱系は外径100mm、高さ120mmのガラス容器で、下面を除き周囲および上部の蓋の部分、厚さ10mmのポリウレタン樹脂で覆い断熱した。また低温実験系の直径100mm、高さ30mmのガラス容器は、周囲および底面を前記と同様に断熱した。

高温放熱系のガラス容器の中に水中スターラーをセットし、断熱材の上のせ、恒温水槽より38°Cの水を循環させた。薄層空間にセットした電子温度計感温部(B)が一定温度に達した時水の循環を停止し、別に室温で用意しておいた低温実験系(中にスターラーを置き空気を攪拌する)の上に、25°Cの乾燥器中に保存しておいた実験材料を載せ、高温放熱系を密着させた。同時に電子温度計感温部(A)の温度を確認し、電子温度計感温部(B・D)の温度を20mm/minの速度で記録させ、電子温度計感温部(C)の温度変化を0.5°C上昇毎にストップウォッチで読み記録した。電子温度計感温部(B)の温度変化が殆んど見られなくなった点を実験終了とし、同時に電子温度計感温部(A)の温度も確認した。

電子温度計感温部(B)の示す記録カーブをもとに、0.1°Cごとの温度変化を示す時間を求め、これを理論式による数値計算に用いた。

表2に本実験における実験条件を示す。

モデルにもとづく理論式の数値計算、および

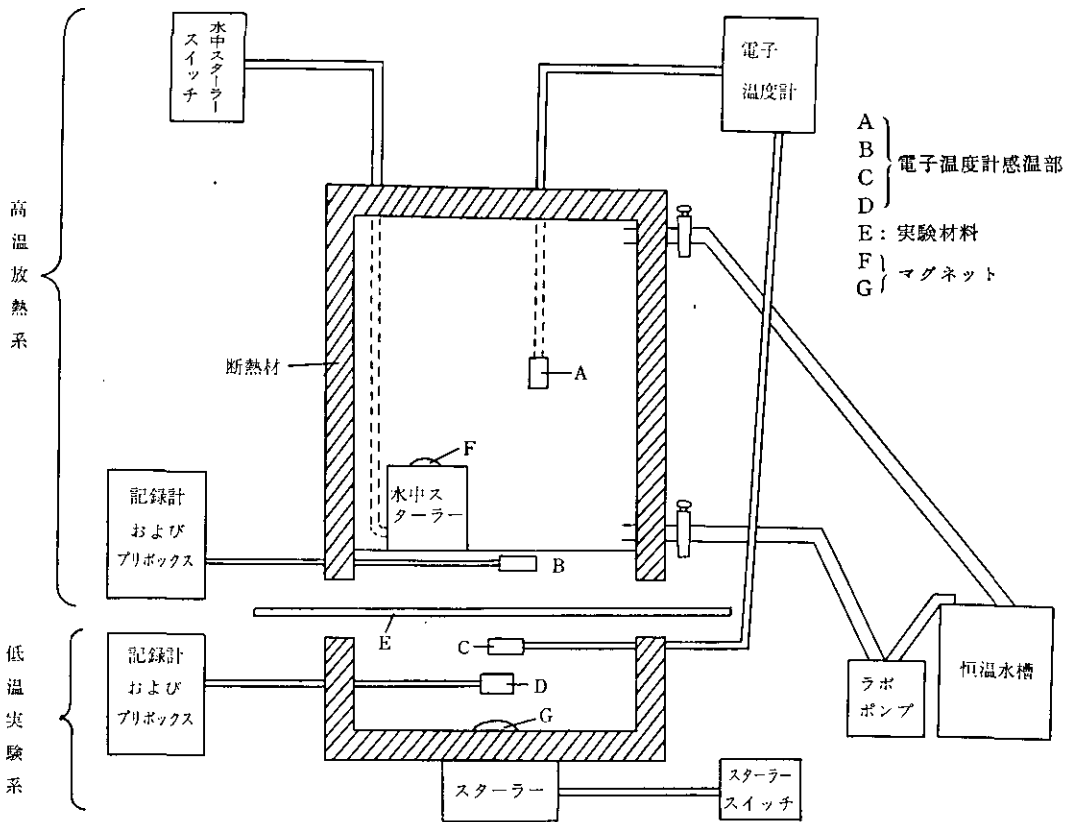


図1 保温性測定装置の略図

表2 本実験におけるコントロール・アクリルの条件

	室温 (°C)	感温部 (B) 実験開始時温度 (°C)	感温部 (B) 実験終了時温度 (°C)	高温放熱系温度 (°C)		所要時間 (sec)
				実験開始時	実験終了時	
コントロール	25.5	32.4	31.25	37.5	37.0	360
アクリル	25.5	33.0	31.05	37.5	36.0	610

※コントロール：材料を用いない実験系

その結果と実験値との比較等は、北海道大学大型計算機センターの計算機を用いた。

なお計算の過程において用いられた各種の係数の単位は、計算式の簡略化のためにすべて省略した。

結果と考察

温度変化曲線について

図2に材料を用いない実験系、および実験材料としてアクリルを用いた場合の、電子温度計感温部 (B) の温度変化曲線を示す。

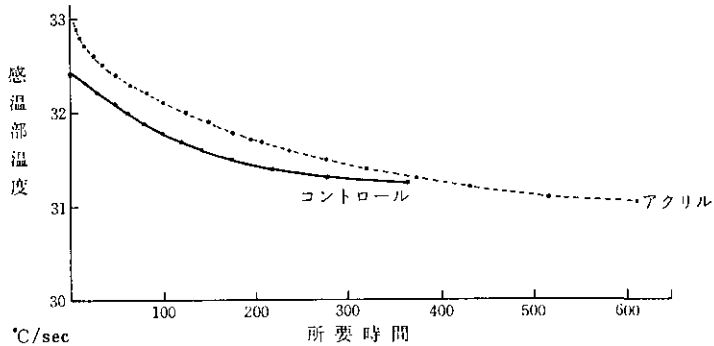


図2 コントロールおよびアクリルの温度変化曲線

コントロールの温度変化曲線についての考察
本考察において用いる記号を表3に示す。

表3 本考察において用いた記号

記号	説明	値	
		コントロール	アクリル
T_{α}	高温放熱系の $t=0$ における温度	37.5°C	37.5°C
β	$t=\infty$ における高温放熱系の温度低下量	0.5°C	1.5°C
k_{α}	高温放熱系から薄層空間への熱移動の比例定数		
y_0	感温部の $t=0$ における温度	32.4°C	33°C
y	感温部温度		
T_{β}	低温実験系の感温部 $t=0$ における温度	25.5°C	25.5°C
k_{β}	薄層空間から低温部への熱移動の比例定数		
T_m	$t=\infty$ における $y-y_0$	-1.15°C	-1.95°C
C	材質の吸熱効果による最大低下温度		0.28°C
τ	材質の吸熱効果に関する定数		
y_K	コントロールにおける温度変化		
y_A	アクリルにおける温度変化		
α	高温放熱系の温度低下に関する係数		

微小時間 (dt) における感温部の温度変化を dy 、高温部から感温部へ入る熱量を dy_{α} 、感温部から低温部へ放出される熱量を dy_{β} とする時

$$dy = dy_{\alpha} - dy_{\beta} \dots\dots\dots(1)$$
 が成立するものと仮定する。

高温放熱系の温度は $t=\infty$ で $\beta^{\circ}\text{C}$ 低下すると仮定し、その温度低下は $(\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}})$ に従うものとする。 t 秒後の高温放熱系の温度はそれゆ

え、 $T_{\alpha t} = \{T_{\alpha} - (\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}})\}$ となる。(1) 式における dy_{α} は高温部と感温部の温度差に比例し、その比例定数を k_{α} とする時、 dy_{α} を規定する(2)式がえられる。

$$dy_{\alpha} = k_{\alpha} \left[\left\{ T_{\alpha} - \left(\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}} \right) \right\} - y \right] dt \dots\dots\dots(2)$$

dy_{β} は感温部と低温部の温度差に比例し、その比例定数を k_{β} とする。2つの系の温度差は $t=0$ において $T = T_{\alpha} - T_{\beta}$ であり、 T は時間の経過に従い $(y_0 - y)$ に比例して低下する。それゆえ

$$dy_{\beta} = k_{\beta} \{ T - h(y_0 - y) \} dt \dots\dots\dots(3)$$

(3) 式における比例定数 h は $y_0 = y = T_m$ の時 $(T - hT_m) = 0$ の関係から $h = \frac{T}{T_m}$ となる。

この値を(3)式に代入して、 dy_{β} を規定する(4)式がえられる。

$$dy_{\beta} = k_{\beta} \left\{ T - \frac{T}{T_m} (y_0 - y) \right\} dt \dots\dots\dots(4)$$

(2) および(4)式を(1)式に代入して、(5)式がえられる。

$$dy = k_{\alpha} \left[\left\{ T_{\alpha} - \left(\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}} \right) \right\} - y \right] dt - k_{\beta} \left\{ T - \frac{T}{T_m} (y_0 - y) \right\} dt \dots\dots\dots(5)$$

上記(5)式において $\lim dt \rightarrow 0$ とする時

$$\frac{dy}{dt} = k_{\alpha} \left(T_{\alpha} - \beta + \frac{\beta}{e^{\alpha t}} - y \right) - k_{\beta} \left\{ T - \frac{T}{T_m} (y_0 - y) \right\} \dots\dots\dots(6)$$

(6) 式を展開して1階1次の微分方程式(7)

をみちびく。

$$\frac{dy}{dt} + \left(k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m}\right)y = k_\alpha T_\alpha + \frac{\beta k_\alpha}{e^{\alpha t}} - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta \frac{T}{T_m} y_0 \dots\dots (7)$$

(7) の微分方程式を解いて (8) 式が得られる。

$$y = \frac{C_0}{e^{(k_\alpha + k_\beta(T/T_m))t}} + \frac{k_\alpha T_\alpha - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta \frac{T}{T_m} y_0}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m}} + \frac{\beta \cdot k_\alpha}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m} - \alpha} \cdot \frac{1}{e^{\alpha t}} \dots\dots\dots (8)$$

(8) 式における C_0 は初期値を決定する積分定数である。(8) 式において $t = \infty$ の時、 $y - y_0 = T_m$ の関係から

$$-1.15 = \frac{k_\alpha T_\alpha - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta \frac{T}{T_m} y_0}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m}} \dots\dots (9)$$

(9) 式に具体的な数値を代入して (10) の関係式が得られる。

$$k_\alpha = -5.085 k_\beta \dots\dots\dots (10)$$

(8) 式における C_0 、 k_β を決定するために $\alpha = 0.001 \sim 0.0025$ と仮定し、 $t = 0$ 、 $y = 0$ 、 $t = 81.3$ 、 $y = -0.5$ の条件を用いて計算を行なった。計算の結果を表 4 に示す。

表 4 α の仮定にもとづく $k_\beta \cdot C_0$ の計算値

No.	α	k_β	C_0	$y=f(t)$
1	0.0010	0.00188	7.7868	$y = \frac{7.7868}{e^{0.00172t}} - 1.15 - \frac{0.6388}{e^{0.0010t}}$
2	0.0015	0.00189	22.1018	$y = \frac{22.1018}{e^{0.00173t}} - 1.15 - \frac{20.9473}{e^{0.0015t}}$
3	0.0020	0.00190	-17.3275	$y = -\frac{17.3275}{e^{0.00174t}} - 1.15 + \frac{18.4730}{e^{0.0020t}}$
4	0.0025	0.00280	115.9874	$y = \frac{115.9874}{e^{0.00256t}} - 1.15 - \frac{114.8226}{e^{0.0025t}}$

表 4 の結果を (8) 式に代入して $y=f(t)$ の形の式を作った (表 4)。表 4 中の $y=f(t)$ は感温部における温度の変化量を示す。ゆえに感温部温度 T は (11) 式になる。

$$T = y_0 + y \dots\dots\dots (11)$$

(11) 式に y_0 および表 4 中の y の式を代入し、各 k_β に対応する温度式を導いた。表 5 に k_β に対応する各温度式を示す。

表 5 各 k_β に対応する感温部の温度式

No.	k_β	$T=f(t)$
1	0.00188	$T = 31.25 + \frac{7.79}{e^{0.00172t}} - \frac{6.640}{e^{0.0010t}}$
2	0.00189	$T = 31.25 + \frac{22.10}{e^{0.00173t}} - \frac{20.950}{e^{0.0015t}}$
3	0.00190	$T = 31.25 - \frac{17.328}{e^{0.00174t}} + \frac{18.473}{e^{0.0020t}}$
4	0.00280	$T = 31.25 + \frac{115.99}{e^{0.00256t}} - \frac{114.82}{e^{0.0025t}}$

表 5 中の No. 1~No. 4 の式に $15.6 \leq t \leq 362.5$ の範囲における t の値 12 ケースを代入し T の

計算を行ない、同一 t 値における実験値感温部温度との比較を行なった。

表6 感温部温度の実験値と理論値の比較

t (秒)	理論値 (°C)				実験値と理論値の差 (°C)			
	1式	2式	3式	4式	1式	2式	3式	4式
15.6	32.30	32.30	32.29	32.27	0.00	0.00	0.01	0.03
31.3	32.20	32.20	32.19	32.13	0.00	0.00	0.01	0.07
48.4	32.09	32.09	32.09	31.99	0.01	0.01	0.01	0.11
64.1	32.00	32.00	32.00	31.87	0.00	-0.00	-0.00	0.13
81.3	31.90	31.91	31.91	31.74	-0.00	-0.01	-0.01	0.16
100.0	31.80	31.81	31.81	31.62	-0.00	-0.01	-0.01	0.18
121.9	31.69	31.70	31.71	31.49	0.01	0.00	-0.01	0.21
143.8	31.58	31.60	31.61	31.37	0.02	0.00	-0.01	0.23
175.0	31.44	31.46	31.49	31.22	0.06	0.04	0.01	0.28
215.6	31.27	31.31	31.34	31.06	0.13	0.09	0.06	0.34
278.1	31.05	31.11	31.16	30.88	0.25	0.19	0.14	0.42
362.5	30.81	30.89	30.98	30.71	0.49	0.41	0.32	0.59

以上の比較からコントロールとしては $\alpha=0.0020$, $k_\beta=0.0019$ の条件が最も実験値に近い近似値を示し、コントロールの温度変化を解析する理論式として

$$y = -\frac{17.3275}{e^{0.00174t}} - 1.15 + \frac{18.4730}{e^{0.0020t}}$$

が最も高い近似値を示すことが見出された。

アクリルの温度変化曲線についての考察

実験系に 25°C のアクリルを保温性測定の被験体として用いた場合、感温部の温度変化速度 $(\frac{dy_A}{dt})$ はコントロールの値に比較して、実験開始約 40 秒位までは $(\frac{dy_A}{dt}) > (\frac{dy_K}{dt})$ となり、その後次第に $\frac{dy_A}{dt}$ は減少し、300 秒を超えた時点からは $\frac{dy_A}{dt} = 0$ となる。この変化を (8) 式を構成する t に関する 2 つのパラメーターの組合せによって説明することを目的として、微分方程式からの理論式を求めた。この式は t の値のある限られた範囲内においては実験値との近似性を示したが、実験データの得られた $0 < t < 520$ の領域において、コントロールの理論式と同程度の近似性を得ることは不可能であった。そのためコントロールの理論式には設定されなかった新しい要因を理論式に追加した。そのパラメ

ーターとしては $\frac{dy_A}{dt} > \frac{dy_K}{dt}$ の条件下における $4y_A - 4y_K = Q$ は実験材料の吸熱効果にもとづくものと仮定し、この吸熱効果を (12) 式とした。

$$Q = (C - \frac{C}{e^{it}}) \dots\dots\dots(12)$$

(4) 式の k_β に作用する温度差の項に、更に吸熱効果に伴なう温度の減少分を加え (1) 式の $4y = 4y_\alpha - 4y_\beta$ の関係式を微分方程式に変換して (13) の方程式をみちびいた。

$$\frac{dy}{dt} + (k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m})y = (k_\alpha T_\alpha - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta \frac{T}{T_m} y_0 - Ck_\beta) + \frac{\beta k_\alpha}{e^{at}} + \frac{Ck_\beta}{e^{it}} \dots\dots\dots(13)$$

(13) の微分方程式を解いて (14) 式をえた。

$$y = \frac{C_0}{e^{(k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m})t}} + \frac{k_\alpha T_\alpha - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta \frac{T}{T_m} y_0 - Ck_\beta}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m}} + \frac{\beta k_\alpha}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m} - \alpha} \cdot \frac{1}{e^{at}} + \frac{Ck_\beta}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m} - \gamma} \cdot \frac{1}{e^{it}} \dots\dots\dots(14)$$

(14) 式に吸熱効果による減少分を加え (15) 式

を導いた。

$$\begin{aligned}
 y = & \frac{C_0}{e^{(k\alpha + k\beta(T/T_m))t}} \\
 & + \frac{k_\alpha T_\alpha - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta \frac{T}{T_m} y_0 - Ck_\beta}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m}} \\
 & + \frac{\beta k_\alpha}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m} - \alpha} \cdot \frac{1}{e^{\alpha t}} \\
 & + \frac{Ck_\beta}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m} - \gamma} \cdot \frac{1}{e^{\gamma t}} - \left(C - \frac{C}{e^{\gamma t}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

(15)式における γ を含む第4項は $t=15.6$ までは $0.02\sim 0.01$ の値をとるが、更に t が大きくなるときの y の少数第2位の値には殆んど影響をおよぼさないことが明らかにされた。(15)式における $C_0 \cdot k_\beta$ の計算を行なう場合、上記の理由から γ を含む第4項は省略し、吸熱効果に伴う補正を第5項の(12)式に由来する部分のみとし、(16)式を用いて以後の計算を行なった。

$$\begin{aligned}
 y = & \frac{C_0}{e^{(k\alpha + k\beta(T/T_m))t}} \\
 & + \frac{k_\alpha T_\alpha - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta \frac{T}{T_m} y_0}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m}} \\
 & + \frac{k_\alpha \beta}{k_\alpha + k_\beta \frac{T}{T_m} - \alpha} \cdot \frac{1}{e^{\alpha t}} - \left(C - \frac{C}{e^{\gamma t}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

表7 α の仮定にもとづく $k_\beta \cdot C_0$ の計算値

No.	α	k_β	C_0	$y=f(t)$
1	0.0015	0.0027	41.7935	$y = \frac{41.79}{e^{0.00181t}} - 1.95 - \frac{40.07}{e^{0.0015t}} + \frac{0.28}{e^{0.070t}}$
2	0.0018	0.0026	-15.2219	$y = -\frac{15.22}{e^{0.00155t}} - 1.95 + \frac{16.89}{e^{0.0018t}} + \frac{0.28}{e^{0.070t}}$

表8 各 k_β に対応する感温部の温度式

No.	k_β	$T=f(t)$
1	0.0015	$T = 31.05 + \frac{41.79}{e^{0.00181t}} - \frac{40.07}{e^{0.0015t}} + \frac{0.28}{e^{0.070t}}$
2	0.0018	$T = 31.05 - \frac{15.22}{e^{0.00155t}} + \frac{16.89}{e^{0.0018t}} + \frac{0.28}{e^{0.070t}}$

吸熱効果に伴う $C \cdot \gamma$ の値は、コントロールとアクリルの温度変化曲線の比較から $t=25.0$ のとき $Q=0.23$, $t=48.4$ のとき $Q=0.27$, $t=\infty$ のとき $Q=0.28$ の条件を成立させるように(12)式を用いて計算した。その結果 $C=0.28$, $\gamma=0.070$ の値が得られた。

(16)式における $k_\beta \cdot C_0$ の値は(8)式の計算と同様に α の値も仮定し、更に上記 $C \cdot \gamma$ の値を導入し $t=0$ $y=0$ と吸熱効果による影響が無視できる $t=300$ $y=-1.55$ の条件にもとづいて計算をおこなった。

α の値はコントロールの実験系との比較から、布を用いた場合には、コントロールでの値 $\alpha=0.0020$ よりさらに低い値をとることが推察される。それゆえ $\alpha=0.0018$, $\alpha=0.0015$ の値を用い、(16)式の計算を行なった。計算の結果を表7に示す。

表7の結果を(16)式に代入して $y=f(t)$ の形の式を導いた(表7)。表7中の $y=f(t)$ は感温部における温度変化量を示す。ゆえに感温部温度 T は(11)式になる。(11)式に y_0 および表7中の y の式を代入し、各 k_β に対応する温度式を導いた。表8に各式を示す。

表8中のNo. 1, No. 2の式に $6.30 \leq t \leq 518.8$ の範囲内における t の値19ケースを代入し T の計算を行なった。また同一 t 値における実験値との比較を行なった。その代表的な値10ケースを表9に示す。

表9 感温部温度の実験値と理論値の比較

t (秒)	理論値(°C)		実験値と理論値の差 (°C)	
	1式	2式	1式	2式
6.3	32.93	32.86	-0.03	0.04
15.6	32.77	32.71	-0.07	-0.01
34.4	32.55	32.52	-0.05	-0.02
65.6	32.34	32.31	-0.04	-0.01
103.1	32.12	32.11	-0.02	-0.00
150.0	31.88	31.88	0.02	0.02
206.3	31.62	31.65	0.08	0.05
278.1	31.35	31.40	0.15	0.10
371.9	31.08	31.15	0.22	0.15
518.8	30.78	30.88	0.32	0.22

以上の表の結果からアクリルを用いた系では $\alpha=0.0018$, $k_p=0.0026$, 理論式としては

$$y = -\frac{15.22}{e^{0.00155t}} + \frac{16.89}{e^{0.0018t}} + \frac{0.28}{e^{0.070t}} - 1.95$$

が最も高い近似性を示すことが見出された。

アクリルの k_p についての考察

k_p は布の熱貫流係数としての意味を持つ係数である。コントロール系に比し、アクリル系で k_p がより大きい値を示すことは、この実験系においてアクリルが保温効果を示さないことを意味する。これは図2の結果における $t < 40$ における $\frac{dy_A}{dt} > \frac{dy_K}{dt}$ からも明らかである。その理由としては $t=0$ におけるアクリルの温度が 25°C であり、実験開始時の薄層空間の温度に比べて低く、そのため空間の熱を積極的にアクリルが吸収して感温部の温度を低下させたことがあげられる。また布の熱容量が空気の値よりも高く、そのため布を設定することにより空間の温度差勾配を更に増大させ、対流による熱移動速度を増加させるものと推定される。

これらの効果は布の吸熱効果 (12) 式の導入によって、数式的には $t < 40$ の状態では殆んど修正がなされているが、 t の大きな値のとき、吸熱効果のおよぼす影響については理論式の中では充分処理がなされていない。またこの理論式の特徴として $t > 300$ では理論式は実験値に

比較してより低い値を示す。この傾向は t の増加に伴い一層強く現われる。この現象を数式的に処理するためには、(16) 式のモデルに更に新たなパラメーターを導入することが必要であろうと推測される。これらの理論式の修正は必然的に k_p の値を小さくする方向へと作用する。

以上のような理論式の持つ問題点を、更に今後解決して行く過程の中で、布のもつ熱貫流係数的な要因は数式的により正確に規定されてゆくものと考えられる。

結 論

本論文においては熱移動速度の変化を観察する実験系を設置し、高温放熱面と実験材料との間に作られた薄層空間の温度変化を記録した。この値と実験系モデルから導かれた理論式との比較を行ない、実験系の熱貫流係数的要因を数量的に明らかにすることができた。すなわちコントロールの実験系については

$$\alpha = 0.0020 \text{ deg/sec}\cdot\text{deg}$$

$$k_p = 0.0019 \text{ deg/sec}\cdot\text{deg}$$

の条件のとき、最も実験値に近い近似値を示し、コントロール系の温度変化を示す式として

$$y = -\frac{17.3275}{e^{0.00174t}} + \frac{18.4730}{e^{0.0020t}} - 1.15$$

を見出した。

アクリルを被験体として用いた系では

$$\alpha = 0.0018 \text{ deg/sec}\cdot\text{deg}$$

$$k_p = 0.0026 \text{ deg/sec}\cdot\text{deg}$$

$$C = 0.28^\circ\text{C}$$

$$r = 0.070 \text{ deg/sec}\cdot\text{deg}$$

の条件のとき、最も実験値に近い近似値を示し、アクリル系の温度変化を示す式として

$$y = -\frac{15.22}{e^{0.00155t}} + \frac{16.89}{e^{0.0018t}} + \frac{0.28}{e^{0.070t}} - 1.95$$

を見出した。

以上の k_p の値にもとづき、本実験系におけるアクリルの保温効果について若干の考察を行った。