

被服材料の保温性の研究

その13 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

本論文のシリーズにおいては被服材料の保温性の測定とともに保温性測定のための実験系の開発、さらに保温性に対する理論的考察を重ねてきた。以上の結果布の保温性には熱貫流の阻害効果的要因と、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を明らかにした。

これらの要因をさらに詳細に解明することを目的として、前報¹⁾において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するものである。このため次の4点の温度変化を、同時平行的に測定できるように装置が作られている。1. 高温放熱系の温度、2. 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、3. 低温系の中の実験材料と近接する空間の温度、4. 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。

前回の実験においては、そのうち特に高温放熱面と、実験材料の間に作られる薄層空間の温度変化を記録し、この温度変化曲線に対する理論的考察を行なった。その結果実験系における熱移動モデルにもとづく理論式から、ほぼ近似的に温度変化曲線を説明することができ、また実験系の熱貫流に関連する係数を数量的に明らかにすることができた。

本報においては前回実験において今後の課題として残されていた、次のような近似値的要素や、仮定にもとづく問題点を解明することを目的として実験ならびに数値計算を行なった。すなわち前報では

1. 高温放熱系の温度変化については実測値が用いられず、温度変化曲線の説明に対して最も高い近似値を示す値が仮定として計算に用いられた。今回は高温放熱系の温度変化の測定から実測値をえ、これを計算に用いた。

2. 薄層空間における温度変化曲線については、前回は *Logistic curve* の考え方が用いられた。そのため経過時間の無限大の時点において、始めて温度変化曲線は平衡状態に到達した。しかしこの系における温度変化は約300~400秒位の時点で最初の平衡点に到達し、それ以後曲線の向きは反転し最終的な平衡状態に向って変化する。(図1参照) それゆえ前報においては300秒以後の測定において、温度変化曲線と理論値との間に差違を生じた。今回の論文においては以上の点を改め、最初の平衡点において実測値と理論式とが一致するよう熱移動モデルの変更を行ない、それにもとづく微分方程式の解を求めた。

3. 先回の実験系においては、高温系と低温系の温度差は12℃であった。今回の実験系においてはこの温度差をさらに大きくし、熱移動速度を増大させることによって、現象の特徴や、現象を規定する各要因間の関係を、より顕著にすることを目的とした。

4. 前報において指摘された被服材料の吸熱効果を除くために、本論文の実験においては被服材料を初めから高温放熱系にセットしておき、系と被服材料の作る薄層空間の温度が平衡状態に達した時点で実験を行なった。

なお本論文においては対照としての意味を持つ被服材料を含まない実験系(コントロール系とする)を用い、その薄層空間(B点)の温度変化曲線に対する理論的考察を報告する。

方 法

実験に用いた設備は前報¹⁾と同様である。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、断熱材の上の恒温水槽より45℃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温度(B)(前報図1)が平衡状態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)の上に高温放熱系を密着させ、次の4種の温度の測定を開始した。

1. 高温放熱系感温部温度(A)……温度変化0.1℃毎にストップウォッチで読み記録した。
2. 薄層空間感温部温度(B)……温度変化をフルスケール4℃の記録計で20mm/minの速度で記録させた。
3. 低温実験系感温部温度(C)……温度変化0.5℃上昇毎にストップウォッチで読み記録した。
4. 低温実験系感温部温度(D)……温度変化をフルスケール4℃の記録計で20mm/minの速度で記録させた。

電子温度計感温部温度(B)が最初の平衡温度に到達した時点で実験を終らせ、この感温部の示す記録カーブをもとに、20秒毎の温度を温度平衡点まで求め、これを理論式による数値計算に用いた。なお本論文に用いた記号を表1に示す。

表1 本考察において用いた記号

記号	説明	記号	説明
T_a	高温放熱系の $t=0$ における温度: 45℃	k_β	薄層空間から低温部への熱移動の比例定数
β	$t=0$ における高温放熱系の温度低下量	T_β	低温実験系の感温部 $t=0$ における温度: 28.6℃
α	高温放熱系の温度低下に関する係数	T_m	$t=\infty$ における $y_0 - y$
k_α	高温放熱系から薄層空間への熱移動の比例定数	T	$t=0$ における感温部(B) - 室温: 9.4℃
y_0	感温部(B)の $t=0$ における温度: 38℃	C	実験系の吸熱効果による最大低下温度
y	感温部温度	γ	実験系の吸熱効果に関する定数

また表2に本実験における実験条件を示す。

表2 本実験における条件

系	室温 (℃)	感温部(B) 実験開始温度 (℃)	感温部(B) 平衡点温度 (℃)	温度平衡まで の所要時間 (sec)	高温放熱系 実験開始温度 (℃)	低温系実験 開始温度 (℃)
コントロール	28.6	38.0	35.86	340.0	45.0	28.6

モデルにもとづく理論式の数値計算、および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

1. 温度変化曲線について

図1にコントロール実験系のB点における温度変化曲線を示す。

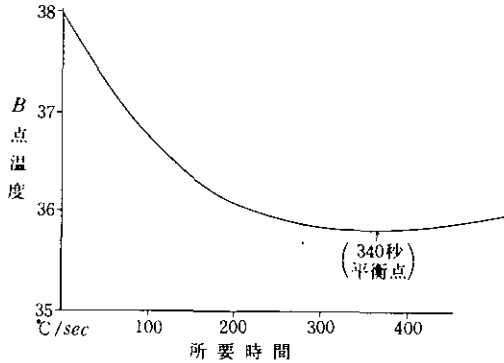


図1 コントロールの温度変化曲線

このカーブの特徴は340秒において平衡点 ($\frac{dy}{dt} = 0$) に達し、以後温度上昇を示すことである。なお温度測定精度は0.1℃である。

2. 高温放熱系の温度変化曲線について

図1のカーブを理論的に解明するためには、高温放熱系における温度変化に関係する係数が必要となる。そのため高温放熱系の温度変化曲線を求めた。(図2)

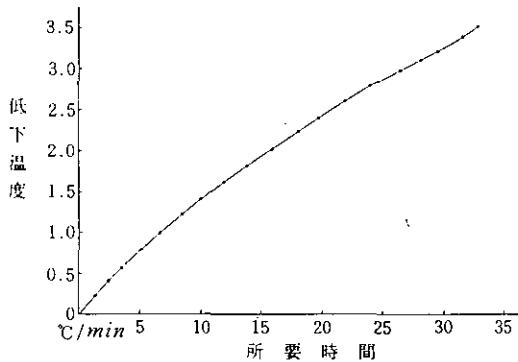


図2 高温放熱系の温度変化曲線

高温放熱系の温度は $t = \infty$ で β ℃ 低下し、さらにその温度変化曲線は $\left(\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}}\right)$ に従うものと仮定し、温度変化曲線上の2点から方程式的に α および β 値を求めた。そのため高温放熱系温度変化曲線上の、900秒および1800秒の2点を選び、その時点における低下温度1.9℃、3.25℃を計算に用いた。これらを $\left(\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}}\right)$ の式に代入し、 $\alpha = 0.00038$ 、 $\beta = 6.56$ の値がえられた。

3. B点における温度変化曲線の温度平衡点について

高温部から薄層空間へ入る熱量を Δy_a 、薄層空間から低温部へ放出する熱量を Δy_b とする時、薄層

空間の温度変化量 Δy は

$$\Delta y = \Delta y_\alpha - \Delta y_\beta \quad \dots\dots(1)$$

となる。

340秒の平衡点においては $\Delta y = 0$ から

$$\Delta y_\alpha = \Delta y_\beta \quad \dots\dots(2)$$

の関係が成立する。

1式における Δy_α は高温部と薄層空間の温度差に比例し、その比例定数を k_α とする。高温放熱系の t 秒後の温度は $T_\alpha - \left(\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}}\right)$ となり、 Δy_α を規定する関係として3式がえられる。

$$\Delta y_\alpha = k_\alpha \left[T_\alpha - \left(\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}} \right) - y \right] \Delta t \quad \dots\dots(3)$$

また Δy_β は薄層空間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。この比例定数を h とすると、 Δy_β を規定する関係として4式がえられる。

$$\Delta y_\beta = k_\beta \{ T - h(y_0 - y) \} \Delta t \quad \dots\dots(4)$$

3、および4式を1式に代入して5式を導くことができる。

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

340秒における平衡点においては

$$k_\alpha \left\{ \left[T_\alpha - \left(\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}} \right) \right] - y \right\} = k_\beta \{ T - h(y_0 - y) \} \quad \text{となり} \quad 5 \text{式における比例定数} h \text{は次のような値となる。}$$

すなわち $y_0 - y = T_m$ とし、 $t = 340$ を5式に代入すると

$$k_\alpha \left\{ \left[T_\alpha - \left(\beta - \frac{\beta}{e^{340\alpha}} \right) \right] - y \right\} = k_\beta \{ T - h T_m \} \quad \dots\dots(6)$$

6式から h を規定する7式がえられる。

$$h = \frac{k_\alpha \left\{ \left[T_\alpha - \left(\beta - \frac{\beta}{e^{340\alpha}} \right) \right] - y \right\} - k_\beta T}{-k_\beta T_m} \quad \dots\dots(7)$$

4. 温度変化を示す微分方程式とその解

5式において Δt は連続量であり、それゆえ次の8式がえられる。

$$\frac{dy}{dt} = k_\alpha \left(T_\alpha - \beta + \frac{\beta}{e^{\alpha t}} - y \right) - k_\beta \{ T - h(y_0 - y) \} \quad \dots\dots(8)$$

8式を展開して1階1次の微分方程式9式が導びかれる。

$$\frac{dy}{dt} + (k_\alpha + k_\beta h)y = k_\alpha T_\alpha + \frac{\beta k_\alpha}{e^{\alpha t}} - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta h y_0 \quad \dots\dots(9)$$

9式の微分方程式の一般解として10式がえられる。

$$y = \frac{C_0}{e^{(k_\alpha + k_\beta h)t}} + \frac{k_\alpha T_\alpha - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta h y_0}{k_\alpha + k_\beta h} + \frac{\beta k_\alpha}{k_\alpha + k_\beta h - \alpha} \cdot \frac{1}{e^{\alpha t}} \quad \dots\dots(10)$$

10式における第2項 $\frac{k_\alpha T_\alpha - \beta k_\alpha - k_\beta T + k_\beta h y_0}{k_\alpha + k_\beta h}$ は時間に規定されない項であり、それゆえ $t = \infty$ における y の値を示す係数となる。高温放熱系からの計算値 $\beta = 6.56$ をこの系に適用すると、この

実験系の温度は図3の模式図のような変化を示すものとなる。

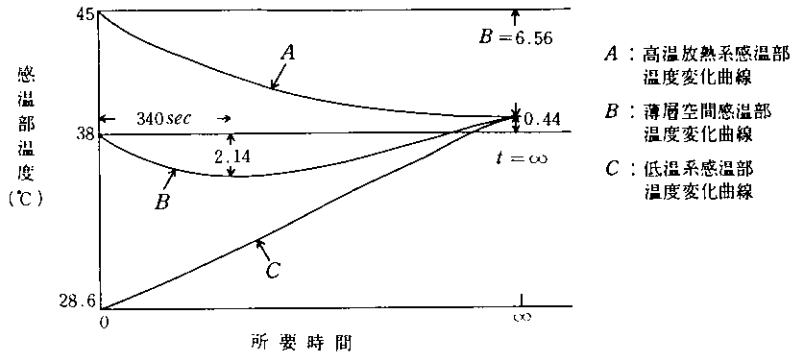


図3 実験系温度変化曲線模式図

すなわちB点では340秒で2.14℃低下し、その後温度は上昇し $t = \infty$ において、38.44℃に達し平衡状態を示すことになる。ゆえに $t = \infty$ の時の値を示す10式第2項は11式の値を示すことになる。

$$0.44 = \frac{k_{\alpha} T_{\alpha} - \beta k_{\alpha} - k_{\beta} T + k_{\beta} h y_0}{k_{\alpha} + k_{\beta} h} \dots\dots(11)$$

この11式に $T_{\alpha} = 45$, $\beta = 6.56$, $T = 9.4$, $y_0 = 38.0$ の値を代入すると、 k_{α} と k_{β} の関係として12式がえられる。

$$k_{\alpha} = 1.43 k_{\beta} \dots\dots(12)$$

この関係を7式に代入すると比例定数 h は13式で規定される。

$$h = -1.2 \dots\dots(13)$$

次に10式における C_0 は初期値を決定する積分定数である。 $t = 0$ の時 $y = 0$ とする数値である。

それゆえ10式に $t = 0$ を代入すると $0 = C_0 + 0.44 + \frac{\beta k_{\alpha}}{k_{\alpha} + k_{\beta} h - \alpha}$ となりこの式から

$C_0 = -0.44 - \frac{\beta k_{\alpha}}{k_{\alpha} + k_{\beta} h - \alpha}$ がえられる。以上の計算によってえられた h , C_0 , k_{α} の値を10式に代入するとき k_{β} と t の関数として次の式が導かれる。

$$y = \left(-0.44 - \frac{9.381 k_{\beta}}{0.23 k_{\beta} - 0.00038}\right) \times \frac{1}{e^{0.23 k_{\beta} t}} + \frac{9.381 k_{\beta}}{0.23 k_{\beta} - 0.00038} \times \frac{1}{e^{0.00038 t}} + 0.44 \dots\dots(14)$$

5. k_{β} 値と平衡温度との関係

14式において $t = 340$ の値を代入するとき、この式は k_{β} を変数とする温度変化曲線の平衡点温度を示すものとなる。 k_{β} の値と平衡点に到達するまでの温度変化量の関係を図4に示す。

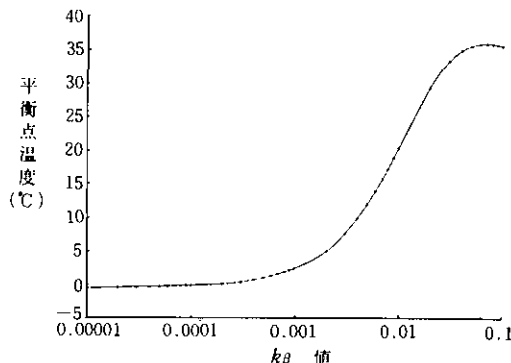


図4 k_{β} 値と平衡点温度

以上図4の結果から、14式では実験系の平衡点である -2.14°C の値はえられないことがわかった。そのため10式を導いた熱移動モデルに、さらに別の温度低下要因を付加することの必要性が指摘される。

6. 吸熱効果を加えた温度変化を示す微分方程式とその解

前記の実験系における熱移動モデルには、実験系を通して熱が外部に放出される効果（これを吸熱効果という）が加えられていなかった。高温放熱系と低温系の温度差が大きいことは系からの熱の放出量も大きくなり、そのためこの効果を0とすることは理論値の平衡点温度を、実験値の値にまで低下させることを不可能にしている。系の吸熱効果を $(C - \frac{C}{e^{\gamma t}})$ に従うものとし、 $t = \infty$ において $C^{\circ}\text{C}$ の温度低下をもたらすものとした。この効果を5式に代入すると

$$\Delta y = k_{\alpha} \left\{ T_{\alpha} - \left(\beta - \frac{\beta}{e^{\alpha t}} \right) - y \right\} \Delta t - k_{\beta} \left\{ T - h(y_0 - y) + \left(C - \frac{C}{e^{\gamma t}} \right) \right\} \Delta t \dots\dots\dots(15)$$

15式において340秒に平衡点を形成するための条件として比例定数 h は16式の値となる。

$$h = \frac{k_{\alpha} \left[T_{\alpha} - \left(\beta - \frac{\beta}{e^{340\alpha}} \right) - y \right] - k_{\beta} T - k_{\beta} \left(C - \frac{C}{e^{340\gamma}} \right)}{-k_{\beta} T_m} \dots\dots\dots(16)$$

15式を微分方程式に変換して17式がえられる。

$$\frac{dy}{dt} = k_{\alpha} \left(T_{\alpha} - \beta + \frac{\beta}{e^{\alpha t}} - y \right) - k_{\beta} \left\{ T - h(y_0 - y) + \left(C - \frac{C}{e^{\gamma t}} \right) \right\} \dots\dots\dots(17)$$

17式の変形として1階1次の微分方程式18式がえられる。

$$\frac{dy}{dt} + (k_{\alpha} + k_{\beta}h)y = k_{\alpha}(T_{\alpha} - \beta) - k_{\beta}(T - hy_0 + C) + \frac{\beta k_{\alpha}}{e^{\alpha t}} + \frac{ck_{\beta}}{e^{\gamma t}} \dots\dots\dots(18)$$

この微分方程式の解として19式がえられる。

$$y = \frac{C_0}{e^{(k_{\alpha} + k_{\beta}h)t}} + \frac{k_{\alpha}T_{\alpha} - \beta k_{\alpha} - k_{\beta}T + k_{\beta}hy_0 - ck_{\beta}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h} + \frac{\beta k_{\alpha}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h - \alpha} \cdot \frac{1}{e^{\alpha t}} + \frac{ck_{\beta}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h - \gamma} \cdot \frac{1}{e^{\gamma t}} \dots\dots(19)$$

19式第2項は $t = \infty$ における平衡点温度を示すものであり、それゆえ $\frac{k_{\alpha}T_{\alpha} - \beta k_{\alpha} - k_{\beta}T + k_{\beta}hy_0 - ck_{\beta}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h} = 0.44$ となる。 C_0 は初期条件設定のための積分定数であり、 $t = 0, y = 0$ の関係から

$$C_0 = -0.44 - \frac{\beta k_{\alpha}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h - \alpha} - \frac{ck_{\beta}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h - \gamma}$$

の値を示す。

さらに19式に系からの吸熱効果による、温度減少分 $(C - \frac{C}{e^{\gamma t}})$ の効果を加え20式を導いた。

$$y = \left(-0.44 - \frac{\beta k_{\alpha}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h - \alpha} - \frac{ck_{\beta}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h - \gamma} \right) / e^{(k_{\alpha} + k_{\beta}h)t} + \frac{k_{\alpha}T_{\alpha} - \beta k_{\alpha} - k_{\beta}T + k_{\beta}hy_0 - ck_{\beta}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h} + \frac{\beta k_{\alpha}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h - \alpha} \cdot \frac{1}{e^{\alpha t}} + \frac{ck_{\beta}}{k_{\alpha} + k_{\beta}h - \gamma} \cdot \frac{1}{e^{\gamma t}} - \left(C - \frac{C}{e^{\gamma t}} \right) \dots\dots\dots(20)$$

7. Cおよび γ 値と温度変化量の関係

吸熱効果に伴う C および γ の値は、 y の値と同時に k_{α}, k_{β} の関係、および h の値を規定する要因として作用する。20式において $\gamma = 0.01$ と仮定し、 C の値として 2.75, 3.0, 3.25, 3.50, 3.75, 4.0 の6ケースについて k_{α}, k_{β} の関係、および h の値を計算した。なお高温放熱系の係数としては、前記の $\alpha = 0.00038, \beta = 6.56$ の値を用いた。その結果を表3に示す。

表3 C値に対応する k_a および h の値

C	k_a	h	340秒における 吸熱効果(°C)
2.75	$1.84k_\beta$	-1.54	2.66
3.0	$1.88k_\beta$	-1.57	2.90
3.25	$1.91k_\beta$	-1.60	3.14
3.50	$1.95k_\beta$	-1.63	3.38
3.75	$1.99k_\beta$	-1.66	3.62
4.0	$2.02k_\beta$	-1.69	3.87

表3の値および $t = 340$ を20式に代入し、吸熱効果を含む k_β の関数としての平衡温度式を作った。それぞれの式において k_β 値を変化させた場合、340秒における平衡点温度は図5に示すような変化を示す。(代表的な値として $C=3.0, 3.5$ および 4.0 の値を示す)

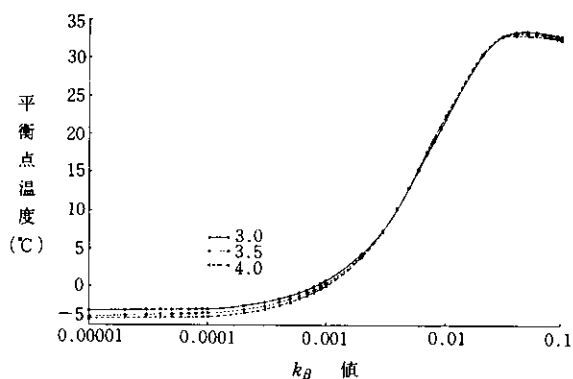


図5 C=3.0, 3.5, 4.0の時の平衡点温度と k_β 値

Cの各ケースにおいて平衡点温度 $y = -2.14$ という実測値を示す k_β 値を表4に示す。

表4 Cの値と -2.14 °Cの平衡点を示す k_β 値

C	k_β
2.75	0.000125
3.0	0.00018
3.25	0.00023
3.50	0.00028
3.75	0.00033
4.0	0.00038

表3の数値、および表4の k_β 値を20式に代入し、時間の関数としての温度変化式 $y=f(t)$ を導いた。(表5)

表5 Cの値に対応する感温部の温度式

C	$y=f(t)$	$T=f(t)$
2.75	$y = \frac{3.999}{e^{0.000375t}} - \frac{4.405}{e^{0.00038t}} + \frac{2.716}{e^{0.01t}} - 2.31$	$T = 35.69 + \frac{3.999}{e^{0.000375t}} - \frac{4.405}{e^{0.00038t}} + \frac{2.716}{e^{0.01t}}$
3.0	$y = \frac{6.461}{e^{0.000558t}} - \frac{6.847}{e^{0.00038t}} + \frac{2.946}{e^{0.01t}} - 2.56$	$T = 35.44 + \frac{6.461}{e^{0.000558t}} - \frac{6.847}{e^{0.00038t}} + \frac{2.946}{e^{0.01t}}$
3.25	$y = \frac{8.97}{e^{0.000713t}} - \frac{9.335}{e^{0.00038t}} + \frac{3.175}{e^{0.01t}} - 2.81$	$T = 35.19 + \frac{8.97}{e^{0.000713t}} - \frac{9.335}{e^{0.00038t}} + \frac{3.175}{e^{0.01t}}$
3.50	$y = \frac{11.993}{e^{0.000896t}} - \frac{12.334}{e^{0.00038t}} + \frac{3.401}{e^{0.01t}} - 3.06$	$T = 34.94 + \frac{11.993}{e^{0.000896t}} - \frac{12.334}{e^{0.00038t}} + \frac{3.401}{e^{0.01t}}$
3.75	$y = \frac{15.575}{e^{0.001089t}} - \frac{15.89}{e^{0.00038t}} + \frac{3.625}{e^{0.01t}} - 3.31$	$T = 34.69 + \frac{15.575}{e^{0.001089t}} - \frac{15.89}{e^{0.00038t}} + \frac{3.625}{e^{0.01t}}$
4.0	$y = \frac{19.492}{e^{0.001254t}} - \frac{19.778}{e^{0.00038t}} + \frac{3.846}{e^{0.01t}} - 3.56$	$T = 34.44 + \frac{19.492}{e^{0.001254t}} - \frac{19.778}{e^{0.00038t}} + \frac{3.846}{e^{0.01t}}$

表5中の $y=f(t)$ は実験系B点における温度変化量を示す。ゆえにB点温度Tは21式によって示される。

$$T = y_0 + y \dots\dots\dots(21)$$

21式に $y_0 = 38$ および表5中の y の式を代入し、各Cの値に対応する温度式を導いた。表5に各式を示す。

表5の $T=f(t)$ の式に t の値を20秒毎に代入し T の計算を行ない、同一時間における実験値と理論値の比較を行なった。図6に各時間における(実験値-理論値)の値を示す。

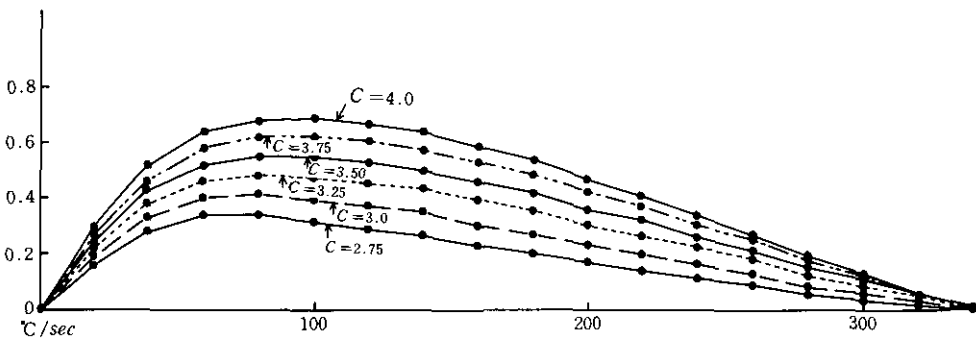


図6 B点温度の実験値と理論値の差

図6の結果から $\gamma = 0.01$ を用いた場合、 $C = 2.75$ の値で最も実験値に近似度の高い理論式をえることが認められる。しかしなお、60~80秒では 0.34°C の相違を生じている。またいずれの温度式の場合も理論値の方が、温度低下が急激に行われることを示している。そのため系の放熱効果を平衡点到達以前の時間において一定比率で減少させる操作が必要となる。その方法として γ 値を変化させた。

$C = 2.75$ および、 $C = 4.0$ の二つのケースにおいて $\gamma = 0.01, 0.0075, 0.0050$ の値を用い、前記と同様の方法で k_α, k_β の関係、 h の値を求めた。その結果を表6に示す。また表6の値を用いた平衡温度式において、 $y = -2.14$ の値を示す k_β の値を表6に記載した。

表6 γ の値に対応する k_a 、 h および k_B 値

	γ	k_a	h	340秒における 吸熱効果	k_B
$C=2.75$	0.0100	$1.84k_B$	-1.54	2.66	0.000125
	0.0075	$1.82k_B$	-1.52	2.54	0.000094
	0.0050	$1.77k_B$	-1.47	2.25	0.000026
$C=4.0$	0.0100	$2.02k_B$	-1.69	3.87	0.00038
	0.0075	$1.99k_B$	-1.66	3.69	0.00034
	0.0050	$1.93k_B$	-1.59	3.27	0.00024

次に表6の数値を用いて $T=f(t)$ の温度式を導いた。表7に $T=f(t)$ を示す。

表7 $C=2.75$ および 4.0 の場合の $\gamma=0.010, 0.0075, 0.0050$ を用いた時の温度式

C	γ	$T=f(t)$
2.75	0.0100	$T=35.69 + \frac{3.999}{e^{0.0000375t}} - \frac{4.405}{e^{0.00038t}} + \frac{2.716}{e^{0.01t}}$
	0.0075	$T=35.69 + \frac{2.783}{e^{0.000028t}} - \frac{3.188}{e^{0.00038t}} + \frac{2.715}{e^{0.0075t}}$
	0.0050	$T=35.69 + \frac{0.385}{e^{0.000008t}} - \frac{0.811}{e^{0.00038t}} + \frac{2.736}{e^{0.005t}}$
4.0	0.0100	$T=34.44 + \frac{19.492}{e^{0.0001254t}} - \frac{19.778}{e^{0.00038t}} + \frac{3.846}{e^{0.01t}}$
	0.0075	$T=34.44 + \frac{16.318}{e^{0.000112t}} - \frac{16.574}{e^{0.00038t}} + \frac{3.816}{e^{0.0075t}}$
	0.0050	$T=34.44 + \frac{9.938}{e^{0.000082t}} - \frac{10.183}{e^{0.00038t}} + \frac{3.805}{e^{0.005t}}$

前記と同様の方法で、同一時間における B 点温度と理論値との比較を行なった。その結果を図7に示す。

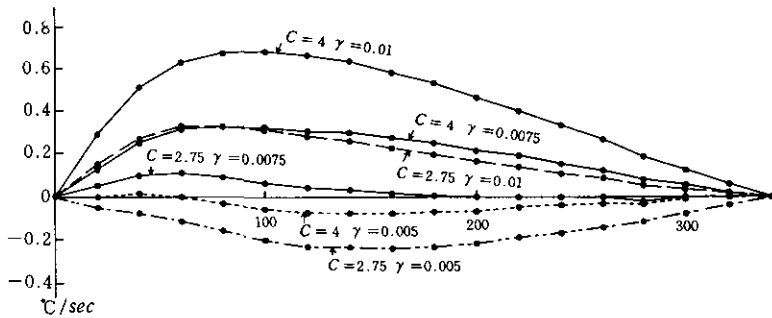


図7 B 点温度の実験値と理論値の差

図7の結果から、 C の値の変化以上に γ 値の変化の方が理論値を実験値に近づけるのに有効であること、そして $C=4.0$ 、 $\gamma=0.005$ の時の理論式が最も高い近似値を示すことが認められた。

8. B点の温度変化を示す理論式

理論式の近似度を高めるため、さらに $C=4$ とし、 $\gamma=0.0055$ 、 0.0057 の値を用いて計算を行った。その結果を表8に示す。

表8 $C=4.0$ 、 $\gamma=0.0055$ 、 0.0057 を用いた場合の k_α 、 h 、 k_β 値

C	γ	k_α	h	340秒における 吸熱効果	k_β
4.0	0.0055	$1.945k_\beta$	-1.61	3.384	0.000266
	0.0057	$1.952k_\beta$	-1.62	3.424	0.000275

表8の数値を用いて前記と同様に20式に代入し $T=f(t)$ の温度式を導いた。表9に $T=f(t)$ の温度式を示す。

表9 $C=4.0$ 、 $\gamma=0.0055$ 、 0.0057 を用いた場合のB点温度式

No.	γ	$T=f(t)$
1	0.0055	$34.44 + \frac{11.422}{e^{0.000089t}} - \frac{11.655}{e^{0.00038t}} + \frac{3.803}{e^{0.0055t}}$
2	0.0057	$34.44 + \frac{11.953}{e^{0.000091t}} - \frac{12.197}{e^{0.00038t}} + \frac{3.804}{e^{0.0057t}}$

前記と同様の方法で同一時間におけるB点温度と、理論値温度との比較を行なった。その結果を表10および図8に示す。

表10 感温部温度の実験値と理論値の比較

t (sec)	実験値 ($^{\circ}\text{C}$)	理論値		実験値と理論値の差	
		1式	2式	1式	2式
20.0	37.70	37.67	37.66	0.03	0.04
40.0	37.45	37.38	37.37	0.07	0.08
60.0	37.20	37.13	37.11	0.07	0.09
80.0	36.96	36.91	36.89	0.05	0.07
100.0	36.75	36.72	36.69	0.03	0.06
120.0	36.57	36.56	36.53	0.00	0.04
140.0	36.43	36.42	36.39	0.00	0.04
160.0	36.30	36.30	36.27	-0.00	0.03
180.0	36.20	36.20	36.17	0.00	0.03
200.0	36.11	36.12	36.09	-0.00	0.02
220.0	36.05	36.05	36.02	0.00	0.03
240.0	35.99	35.99	35.97	0.00	0.02
260.0	35.95	35.94	35.93	0.00	0.02
280.0	35.90	35.91	35.90	-0.00	0.00
300.0	35.89	35.88	35.88	0.00	0.01
320.0	35.87	35.87	35.86	0.00	0.00
340.0	35.86	35.86	35.86	0.00	0.00

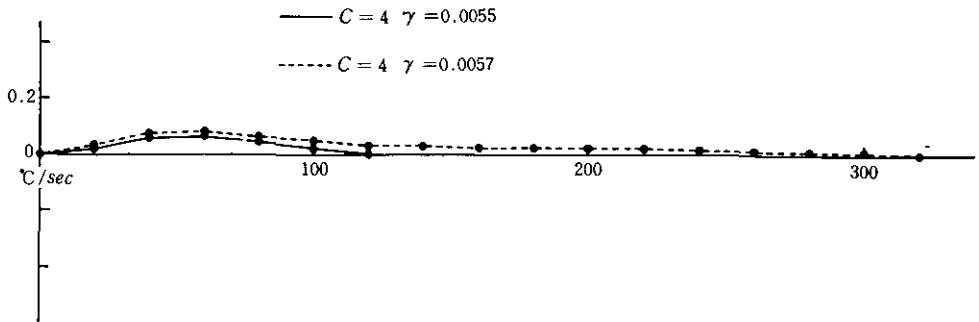


図8 B点温度の実験値と理論値の差

表10, および図8の結果から, B点における温度変化は $\beta=6.56^{\circ}\text{C}$, $\alpha=0.00038\text{deg/sec}\cdot\text{deg}$, $k_B=0.000266\text{deg/sec}\cdot\text{deg}$, $\gamma=0.0055\text{deg/sec}\cdot\text{deg}$, $C=4^{\circ}\text{C}$ の条件を用いた理論式

$$y = \frac{11.422}{e^{0.000689t}} - \frac{11.665}{e^{0.00038t}} + \frac{3.803}{e^{0.0055t}} - 3.56$$

が最も高い近似値を示すことが見出された。以上の結果が本論文における結論である。

ま と め

本報においては保温性測定のための実験系における高温系と低温系の温度差を大きくした場合の、熱移動の要因の解析を行なった。その結果、前報と異なり、系の吸熱効果を要因として組入れ、基本的には二つの系の間での温度差に比例して熱移動が行なわれるとするモデルによって、かなりの高い近似値度において実験系における温度変化を説明することができた。また最初の温度平衡点の成立が、系に入る熱量と、出る熱量の等量関係によって成立するとする考え方も、理論値と実験値との高い近似性から支持されるものと考えられる。この点は前回の論文の基本的考え方と異なる点であり、前報においては平衡点の成立を $t=\infty$ の条件で設定した。そのため平衡点温度を正確に理論式から計算することができなかつた。今回の論文においてはその点は十分に克服されたといえる。なお100秒までにおける理論値と実験値の相違は最大 0.07°C であるが、温度変化量に対しては約10%程度の誤差となっている。この誤差の修正はCおよび γ の値を調整することによって、或る程度行なうことが見込まれるが、しかし完全に理論値と実験値の一致を導くことは予測されない。この時点において、モデル化されない別の要因の作用する可能性も考えられる。これらの点については今後の検討事項となる。

なお本論文においては吸熱効果として作用するCおよび γ 値は、理論式が最も高い近似値を形成する条件に合わせて設定され、仮定的な数値となっている。C, γ の実測は実験的には困難であるが、この数値の客観性を検討するために、別の理論的方法によってこの数値を導く必要がある。以上のような検討は高温放熱系と低温系の温度差の大きな系においては、理論値の精度を高める上に重要なこととなる。

k_B の値は熱貫流係数としての意味を持つものであり、この値の逆数が保温効果として作用する。それゆえ被服材料の保温性測定においては、材料を設定した系と設定しない系の k_B 値の比較が、材料の保温効果を示すものとなる。そのためにはコントロール系の k_B の値は精度の高い値をえることが必要となる。前回の論文と比較する時、コントロール k_B の値は約 $1/4$ の値を示している。モデルの考え方、用いた係数の相違等によってこのような差違が生じたものと考えられるが、しかし理論式

の精度を高めることによって、 k_{β} 値が前論文の値より減少することは前報の考察においても予測されたことである。 k_{β} の値が一定の値より大きくなると、実験系においては、実験開始とともにB点の温度は上昇し、スタート時点より高い温度で平衡点に到達することが理論的に明らかにされた。以上のような現象からも k_{β} 値は k_{α} との関係において、実験系の温度変化を規定する重要な要因であることがわかる。

引用文献

- 1) 寺岡・若山：北星短大紀要，19，19（1977）