



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	室温変動率に関する検討
Author(s)	射場本, 勘市郎
Citation	衛生工学, 6, 23-35
Issue Date	1961-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/36152
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_23-35.pdf



室温変動率に関する検討

射場本 勘市郎*

(昭和36年5月8日受理)

Analytical Treatments on Several Factors affecting
Temperature Changes in "Warm up or Cool down" Rooms

Kan'ichiro Ibamoto

ABSTRACT

The author has found out the basic Equation (7) giving the temperature fall ($T_m - T$) in "Cool down" as well as its growing clearance ($T_m - T$) in "Warm up".

The first exponential term has the famous coefficient δf where the suffix f means the final stable state. Be care of miscasting δo , because it roles in the other stable state before the original condition. Moreover the practical values are commutative in "Warm up" and in "Cool down".

With the general δ , the author regards its change as the probability curve. Then the second exponential term has the error function ϕ . Further delicate treatments shown in the Fig. 4 give birth the twin of the third exponential term.

The more important temperature change of the indoor air may be figured by means of the dimensional Equation(11) and (12).

After all, the Equation (9) expresses the wall temperature where x is the distance from the inside surface.

1 緒 言

暖房における過渡現象としての Warm up や Cool down に際して、室温の経過を計画的に予測する方法は、目下のところ余り精度が宜しくないのが実情である。

この問題については既に大正末期に三浦進一博士の論文が発表されて居り⁽¹⁾その内容は現今も多く参考書に掲載され、⁽²⁾ もはや定説化したような観がある。しかし他面において暖房環境の研究者たちの間では、更に修正を要する近似理論であると感じつつ、そのままに改訂が施されずに星霜を経たことも、また周知の事柄なのである。

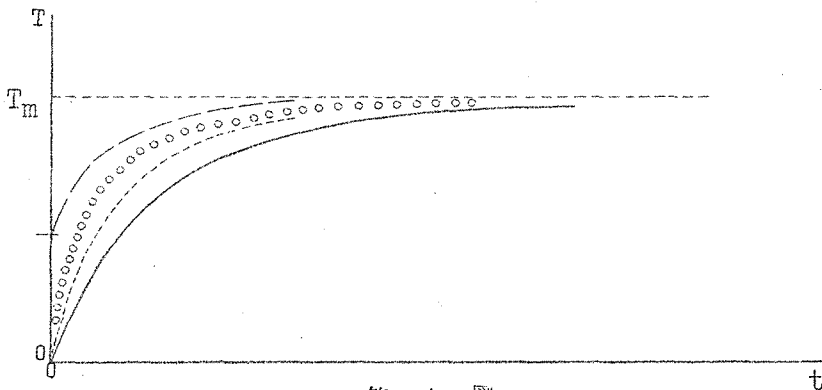
近年に至つて前田敏男博士により「暖房の重み函数」と称して広範な応用を提示する新理論が展開された。⁽³⁾ これは室温変動率と密接な関連を持つものではあるが、熱伝達率や換気回数の時間的な変化を凍結しているのは、他に理由が存するものの残念である。

若しこれが解決されたならば、暖令房の Limit Design や Automatic Control の取扱いが格段の進歩を遂げ、この分野における我が国の技術は、將に世界の Top Level を獲得する可能性が迫つたと云えよう。

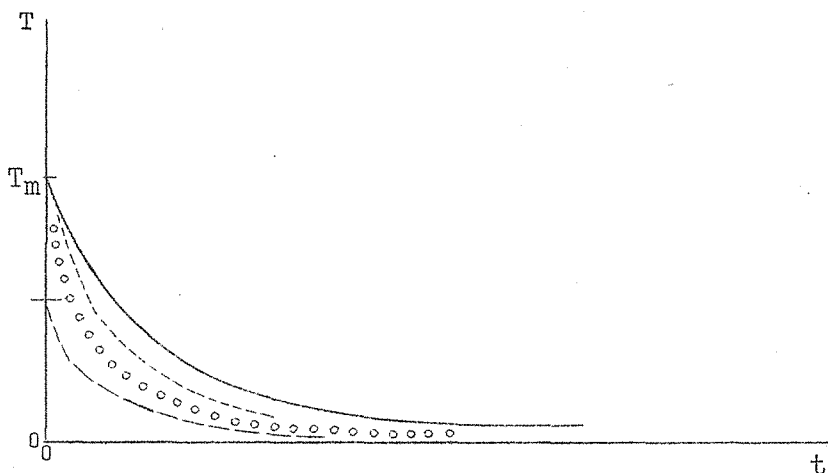
かくの如き背景のもとに、いささかでも研究を進める第一歩として、取敢えず筆者は室温変動率の再検討を行つて見た。

2 室温経過

暖房の Warm up や Cool down に際して、室内の平均気温は第 1 図および第 2 図で ○○○○線で示したような経過を辿つて定常状態に達する。但し t は時間で T は外気温を基準に採つた室内平均気温である。



第 1 図



第 2 図

この経過曲線は近似的に指数函数で表現することが出来て、曾て三浦博士は解析手法により次式を誘導している。

$$T = T_m (1 - e^{-\delta t}) \quad \dots\dots (1)$$

$$T = T_m e^{-\delta t} \quad \dots\dots (2)$$

式中の δ は室温変動率と名付けられた係数であり、その物理的な意味を述べると、定常的な単位温度差の室内外気温の際に、壁体および隙間を通じて行われる単位時間当りの損失熱量と、周壁および室内空気の全熱容量（外気温基準）との比である。

$$\delta = \frac{\text{貫流熱量} + \text{換気熱量}}{\text{周壁熱容量} + \text{室内空気熱容量}} \quad \dots\dots (3)$$

ここに注意を要するのは、定常状態における表現であるから、周壁の平均温度は単層の場合には殆ど単位温度の $1/2$ となる。これの由来としては根源の微分方程式の樹立において、周壁を十分に薄いとして取扱った結果であり、三浦理論式の精度が意外に良くない原因を茲に指摘するのが通説であつた。

しかし筆者が検討したところでは、この点に関しては定常状態からの解釈を素直に受け入れても構わないと思われ、懸隔を呈する理由はむしろ他に存在していることを見出した。

その詳細は追つて述べることにして、第 1 図および第 2 図に点線で示した

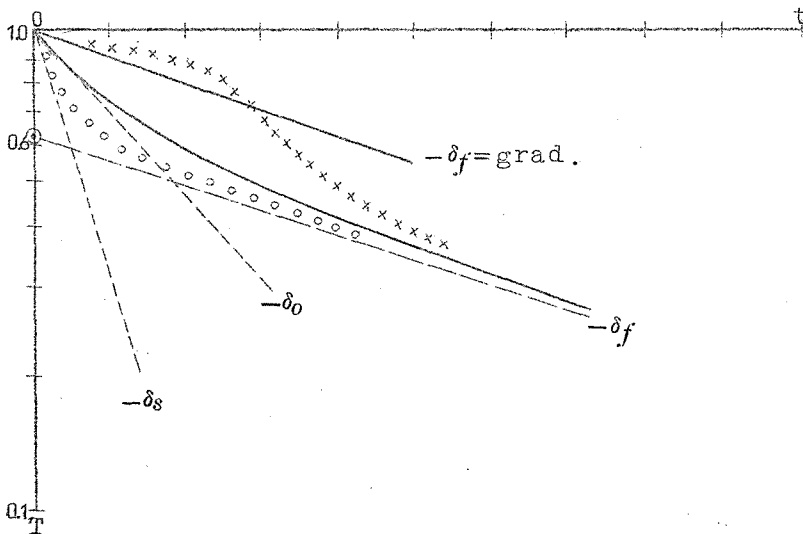
のが、式(1)および式(2)を具現したいいわゆる成長曲線や減衰曲線である。但し式(3)で与えられる δ の具体値を代入するならば、近似の度合は更に低くなり、図に実線で示したような結果に到るのが実情であつて、この故にこそ天高く暗れ切らぬ悩みが続いて来た次第である。

さて成長曲線は水平軸に対して鏡像を採れば減衰曲線と等しくなる。換言すれば、成長の余地 ($T_m - T$) を新らしく T' と置いて取扱えば、両曲線は全く同様に考えてよい。従つて以下の記述は Cool down を中心にして説明する。

早速ながらこれを利用すると、次節に述べるような根拠から、三浦理論はむしろ約 $0.6 T_m$ (或いは T_m') から出発する鎖線、すなわち式(2)を6割に扱つた場合の方が、より忠実に室内平均気温の経過を少なくとも中期以降について追跡していることになる。

3 δ 値の変化

式(2)において T_m または T_m' を単位温度に採つて Semi-log 座標で図示すると、Cool down は第3図のようになり、Warm up は第9図に示す。

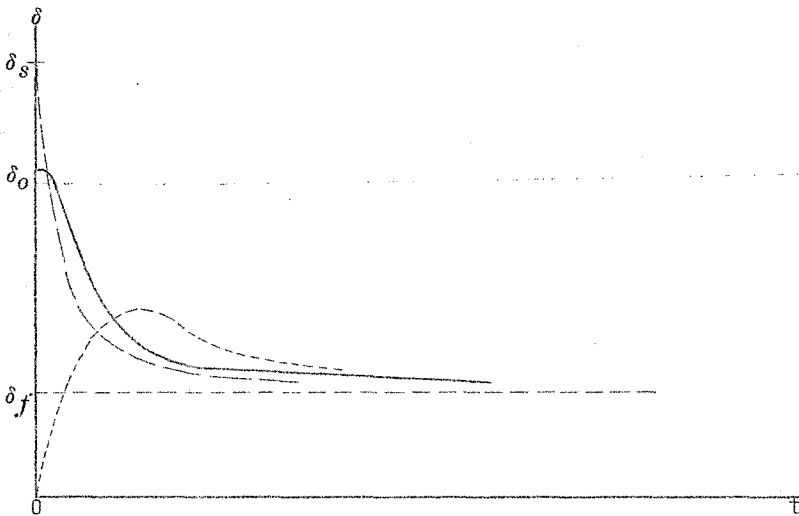


第 3 図

既述のように三浦理論式が現実の経過曲線と合致しないのは、全く室温変動率 δ の値を固定して考えたからで、次に δ を時間の函数として取扱うことを試みる。

幾多の観測値を plot して見たところ、第3図の ○○○○線のような傾向を知ることが出来た。すなわち δ の値は始め大(小)だが次第に一定に近づき、 δ_0 および δ_f とともに式(3)によつて与えられる。

次の問題は時間の函数としての δ を如何なる形で把えるかになるが、例えば減衰曲線など幾つかを試みた結果としては、最も素直に考えられる確率曲線が成功した。



第 4 図

先づ確率曲線の定義によつて

$$\delta - \delta_f = e^{-\pi(\delta_0 - \delta_f)^2 t^2} \quad \dots\dots (4)$$

従つて

$$\begin{aligned} \delta t &= \delta_f t + \int_0^t e^{-\pi(\delta_0 - \delta_f)^2 t^2} dt \\ &= \delta_f t + \frac{1}{2} \phi\{\sqrt{\pi}(\delta_0 - \delta_f) t\} \end{aligned} \quad \dots\dots (5)$$

但し ϕ は誤差函数を表わす。

式(2)に代入して

$$T = T_m e^{-\delta_f t} e^{-\frac{1}{2} \phi\{\sqrt{\pi}(\delta_0 - \delta_f) t\}} \quad \dots\dots (6)$$

誤差函数の性質から $\{ \} > 2$ であれば $\phi \doteq 1$ であるから、式(6)の最終項は τ が適当に大きいとき $1/\phi$ 又は $\sqrt{\theta}$ ($\doteq 0.62$) となり、 $T_m = 1$ として示した第3図では漸近線は縦軸上の定点 0.62 を中心にすべきことが判つた。

本誌の印刷技術では精密な図示を制限されるので割愛するが、三浦報文の観測値について検討したところ、数種の実験が何れも上記に適合した次第である。第3図の方式で求めた終末値 δ_f も、式(3)からの算出値と比較して妥当であり、また当然ながら Warm up の方が Cool down よりも大きな δ_f を得た。

序でながら、原著者がその解説に悩まされた現象の、木材内装した土蔵造における直後降下の異常さについては、他の要点が旨く適合を示したことから推して、むしろ当初の気温測定が輻射の影響を受けていたように想われる。

これら一連の実験は6尺立方の中間規模で行われて居り、窓や扉も備えると共に、天井や床は木造で換気も伴い、且つ壁としては多層または中空層のものも含んでいる。従つてこのような実物に近い試験体に関して、筆者の修正理論が適合したことは甚だ心強さを覚える次第である。

しかし乍らもつと詳細な分析を行うためには、極端に単純化された模型についての基礎実験が必要である。例えば上記では室内気温をその平均値について論じて来たが、三浦実験は空気を人為的に攪拌していないから、偶然にも平均気温を観測した訳ではない筈である。しかも適合性を示したことは、過渡現象における室内気温の分布に関しての法則がその一部を顕示したものであり、更には壁体内部の温度分布についても検討を進めねばならない。

このような基礎事項を取扱うためには、幸いにして建築学教室の最近の修士論文である荒谷実験が、⁽⁴⁾ 取敢えず必要な資料を提供して呉れる。

4 補正項の再加

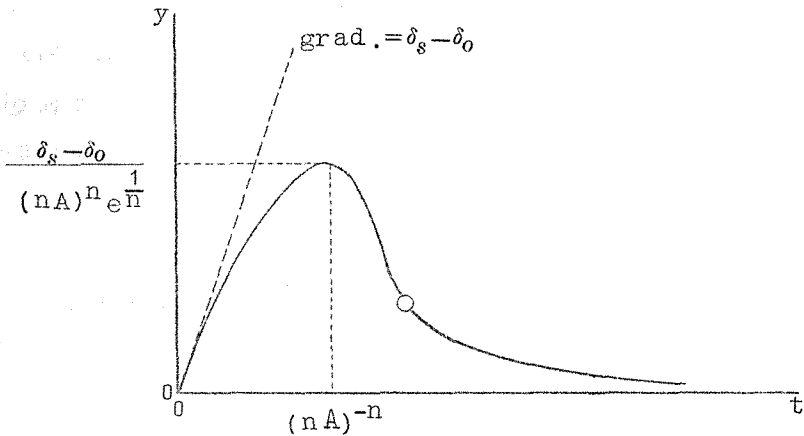
曾ての三浦実験を分析することにより、通説の減衰曲線に補正項を付けた式(6)の妥当さが検討された。しかし実際にはこれだけでは未だ室内気温の変化を表わすのに不充分であつて、第3図に実線で具示したような経過は、結論的に云えば壁内面温度なのである。

第4図では室温変動率の経過をモデル化して確率曲線であるとしたが、もう少し複雑な変化を追加して考えることにし、その歪み具合を次のように取

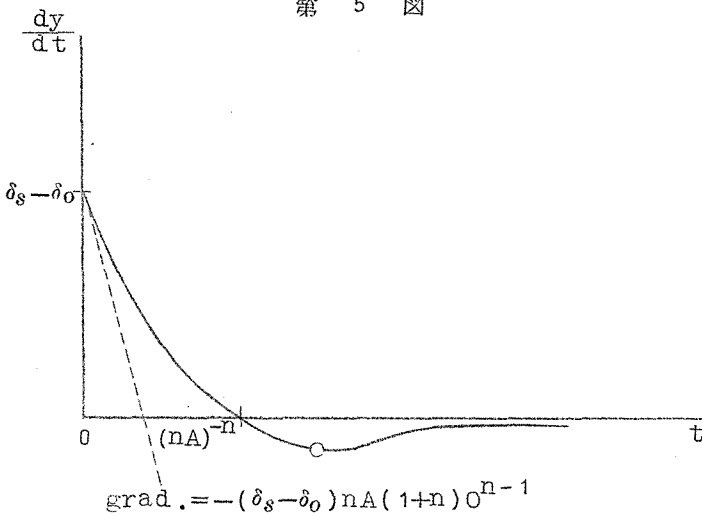
扱つて見る。前節の検討から得られた成果では、経過曲線は少くとも当初と末期に関しては式(6)で表わされ、その中間においては懸隔する可能性があつて第3図の如くなる。従つて式(6)に更に加える補正項は、このような性格を考慮して次式へと発展する。

$$T = T_m e^{-\delta_f t} e^{-\frac{1}{2} \theta \{\sqrt{\pi} (\delta_o - \delta_f) t\}} e^{-(\delta_s - \delta_o) t} e^{-A t^n} \quad \dots\dots(7)$$

追加した補正項の指数を $(-y)$ と置き、本来ならば $y = \{(\delta_s - \delta_o) t\}^p e^{-A t^n}$ とすべきであるが、第6図へ進展したときの縦軸値の物理的な解釈を参酌して、素直に $p = 1$ を採用した。もちろん $A > 0$ 、 $n > 0$ として考えている。



第 5 図



第 6 図

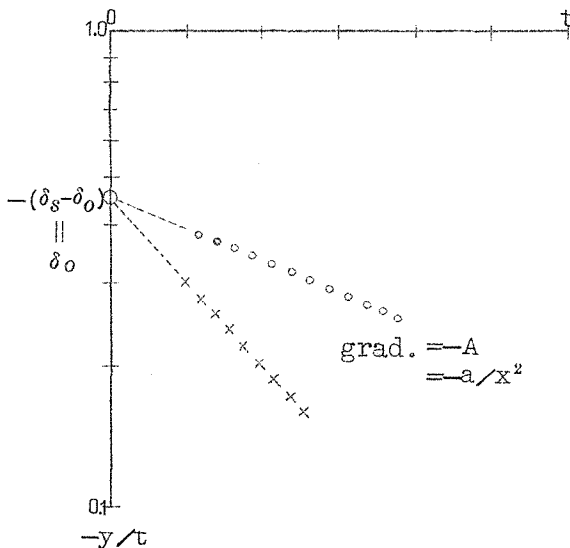
第6図の横軸は第4図の確率曲線を引き伸ばしたものであつて、両図を比較することにより室温変動率 δ の複雑な経過が把握される。

5 壁体温の経過

前掲の荒谷実験は直径70cmで高さ70cmの円筒模型に関するもので、ハードテックスおよびコンクリートについて各所の室内気温と壁体温の経過を測っているが、何れも換気は伴わない。

筆者はこれらの観測値を分析するに当り、先づ第3図の方式で室温変動率の終末値 δ_f を求め、これを式(5)からの計算値と比較してその妥当なことを認めた。特に注目して置くべきことは、Warm upとCool downで δ_0 と δ_f の値を交換するが、在来は大きい方のみを偏愛している。

次に壁温系列の観測値を式(7)に代入して $(-y)$ を算出したところ、その値が何れも正数であつた。更に $(-y/t)$ を計算してSemi-log座標にplotした結果は、第7図のように直線を得た。これは壁温系列に対して再加補正項は $n=1$ であることを示すものである。



第 7 図

壁温系列の観測値を分析した第7図の直線は、それを延長すると縦軸上の定点を過ぎりその値は δ_0 と一致する。すなわち何れも $\delta_s=0$ であつて、壁温

変動率の経過は第4図の点線の如く、また壁温の変化は第3図の×××線のようになる。

壁内面からの深さを x とすると、第7図の分析から実数値を、次元的な立場から見透しを立てて検討したところ次の成果が判つた。但し a は壁材料の温度伝播率である。

$$A = 2a/x^2 \quad \dots\dots (8)$$

従つて壁温経過に関して式(7)は次のように具体化される。

$$T = T_m e^{-sft} e^{-\frac{1}{2}\theta\{\sqrt{\pi}(\delta_0 - \delta_f)t\}} e^{\delta_0 t} e^{-2at/x^2} \quad \dots\dots (9)$$

式(7)は壁の外面および内面についても適用される。特に内面温は実測値では熱気流に混乱され易いが、第3図に実線で示したように基準曲線としての貫録があつて、気温系列へ進攻の足場にもなる。

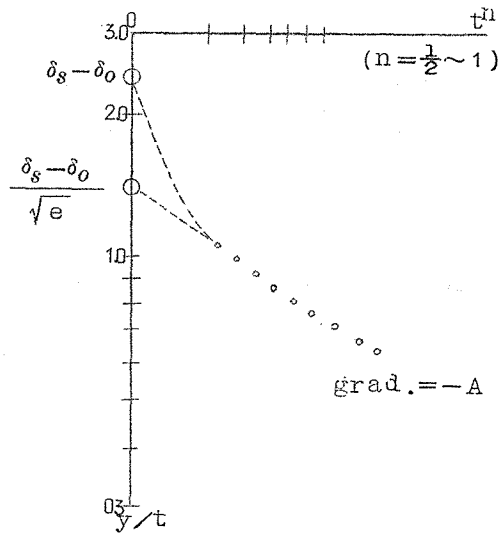
$$T = T_m e^{-\delta_f t} e^{-\frac{1}{2}\theta\{\sqrt{\pi}(\delta_0 - \delta_f)t\}} \quad \dots\dots (10)$$

6 室内気温の経過

室内の気温系列の観測値についても、前節と同様に分析を行つて見た。さすがに壁温系列とは実情が異つて、幾分か輻射の影響を受けているらしい観測値が混在するので、残念ながら余り明確な成果が得られなかつた。

観測値を式(7)に代入して $(-Y)$ を算出したところ、その値は負数を示すことを認めた。次に (Y/t) を計算してSemi-log座標にplotしたが直線は得られず、むしろ横軸を $\sqrt{t}$ で整理した方が好いように思われる。若しこれが正しければ $n = 1/2$ であるが、以降の考察は一応この立場から論じて見る。

気温系列の場合には測点位置の差異に基づく A 値の移動が余り明らかではなく、或は全部が均等なのではないかとも思わせる。しかし既述のように、壁中温の表現式(9)から内面温の表現式(10)を誘導した際の手続きは、 $a/x^2 = \infty$ を代入して行つたものであり、内面温はまた気温系列の特殊な場合すなわち対流熱伝達率 $a = \infty$ とも考えられるので、式(7)を気温系列に適用する際の A には、測点位置により異なるべき a が含まれていることが推察される。ただ A 値の差異が目立たない理由としては、例えば気流速度を u として a/u



第 8 図

のような相殺的な効果を持つ要素の存在を考えればよい。

この推論を援ける現象として、気温系列について第 8 図のような分析をした場合に、傾斜 A は Warm up のとき小さく Cool down では大きい傾向がある。更に分類して見ると、 A 値は周壁の材料や構造に関係がなく、また三浦実験と荒谷実験とでは前者が小さい。従つて A 値は主として空気条件に支配されるが、室の形態や寸法にも影響されることが判る。

以上を総合し且つ式(3)に示した思想を空気に関してのみ適用したものを、次元の立場から整理し実数値の概算をしたところ、有力な候補として次式を得た。

$$A = \frac{\nu}{\kappa} \sqrt{\frac{L}{u}} \left(\frac{\alpha S}{crV} + N \right) \quad \dots\dots (11)$$

但し ν : 動粘性係数

κ : 温度伝播率

α : 対流熱伝達率

cr : 熱容量 (単位温度当り)

N : 換気回数 (単位時間当り)

u : 気流速度

L : 立方体の稜長 (内接円筒の直径)

V : 室容積

S : 室内面の合計面積

式 (11) の中で, α は $u^{0.5-\epsilon}$ に比例するから $\alpha/\sqrt{u} \propto 1/u^\epsilon$ となり, また荒谷実験では $N=0$ であるが三浦実験でも第 1 項に比較して 3 % 以下である。

ν/κ はプラントル数と称される無次元量であり, その数値も常温空気では 0.72 であるから, 概算の立場のみからは必要性を捉え難いのであるが, $\nu=\infty$ または $\kappa=0$ のような極端な場合を試みて対処した。

このようにして求めた A は α , u , N の如き変数を含むから, 既述の δ 値の変化と同様な処理を要する。従つて第 8 図の直線が縦軸を切る点は ($\delta_s - \delta_0$) ではなくて, その $1/\sqrt{e} \doteq 0.62$ 倍である。

ただ横軸を $\sqrt{t}$ であるとしているので, これに対する確率曲線の意味が奇異な印象を与える。しかし自然界には砂の粒度のように対数的な正規分布も存在するから, ここでは敢えて拘泥しないことに決める。

第 8 図の方法で求められる δ_s の値から, 次元を考慮し数値の検討をして樹てた式は次のようになる。

$$\delta_s = \frac{1}{2} \alpha (S/V)^2 \quad \dots\dots (12)$$

7 総 括

暖房における過渡現象の Warm up や Cool down に際して, 室温の経過を支配する要素をまとめた概念に室温変動率がある。しかし理論と実際に若干の懸隔が起り, その修正が望まれながらも長年月に亘つて放置されて来た。

筆者は室温変動率を常数として取扱う慣習から脱却し, その変化を確率曲線と想定して検討したところ, 極めて適合性を高めることが出来た。この成果は室温のみではなく, 壁温についても同じ要領で利用されるものであり, 在来の公式に指数函数の補正項を連乗した形を取る。

分析および検討の資料に用いさせて戴いた観測例の原著者に対して厚く感謝すると共に, このような記録がないため筆者が基礎実験を続行中の, 多層や中空の壁体温への拡張または頻繁な換気回数による確認などの結果は, 何

れ凸版図示が可能な別誌に報告したい。

〔引用文献〕

- (1) 三浦運一：暖房上の得失より見たる本邦各種構造家屋の比較研究，国民衛生，VOL.4，No.1，1926
- (2) 渡辺 要：建築計画原論，1951 など。
- (3) 前田敏男：室温変動理論，建築学大系，VOL.8，1955など。
- (4) 荒谷 登：室温上昇及び降下過程の分析的研究，北大工学研究科建築学専攻修士論文，1961，3

〔追記〕

壁中温に関して求めた $A = 2a/x^2$ は，式(3)の思想を壁および外部境界層にのみ適用したものであるが，この形は半無限壁などの伝熱にも現われ， at/x^2 はフーリエ数と称される無次元量である。

筆者はAの形を確認するために下記のような解析を試みたが，結局は目的の半分しか達することが出来なかつた。

壁内面から深さ x の位置の最高温度 $T_{m,x}$ と，壁内面の最高温度 $T_{m,0}$ との間に，次のような比例が存在する。

$$\frac{T_{m,0}}{R} = \frac{T_{m,x}}{R-(x/\lambda)} \quad \dots\dots (13)$$

但し，Rは壁の熱伝導抵抗と外部境界層の熱伝達抵抗との和であり， λ は壁材料の熱伝導率である。

例をWarm up に採ると式(7)は次のように変形される。但し誤差函数 $\Phi\{\sqrt{\pi}(\delta_0-\delta_f)t\}$ の内容を省略して単に Φ と記す。

$$T_x = T_{m,0} \left(1 - \frac{x}{R\lambda}\right) \left[1 - e^{-\delta_f t} e^{-\frac{1}{2}\Phi} e^{-(\delta_s - \delta_0)t} e^{-At^n}\right] \quad \dots\dots (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_x}{\partial x} = T_{m,0} & \left[-\frac{1}{R\lambda} \left(1 - e^{-\delta_f t} e^{-\frac{1}{2}\Phi} e^{-(\delta_s - \delta_0)t} e^{-At^n}\right) \right. \\ & \left. - \left(1 - \frac{x}{R\lambda}\right) e^{-\delta_f t} e^{-\frac{1}{2}\Phi} e^{-(\delta_s - \delta_0)t} e^{-At^n} \right. \\ & \left. \times (\delta_s - \delta_0) t e^{-At^n} t^n \frac{dA}{dx} \right] \quad \dots\dots (15) \end{aligned}$$

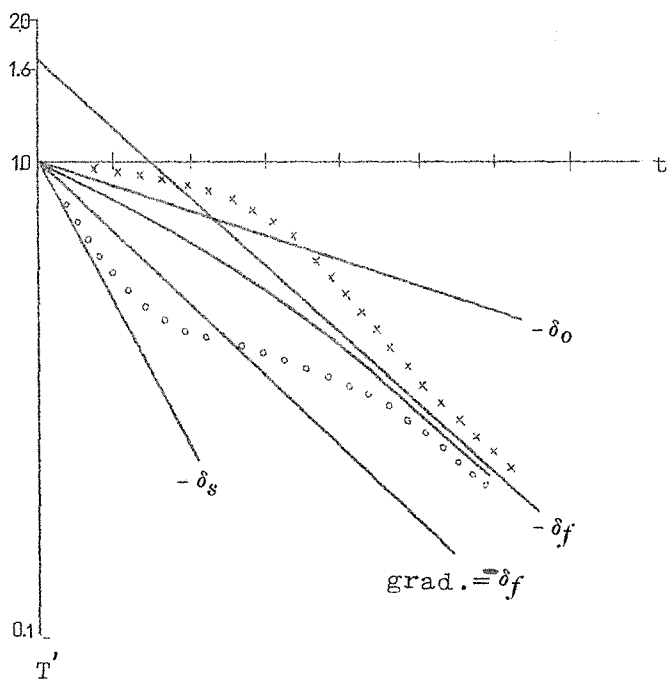
$$\left(\frac{\partial T_x}{\partial x}\right)_{t=0} = 0 \quad \dots\dots (16)$$

$$\left(\frac{\partial T_x}{\partial x}\right)_{t=\infty} = -\frac{T_m \cdot 0}{R\lambda} = \text{const.} \quad \dots\dots (17)$$

式(15)の最終項 $t^n dA/dx$ の次元は $[x^{-1}]$ であることを要するが、これは $A = (a/x^2)^n$ であれば必ずしも $n = 1$ でなくてもよい。従つてここに試みた程度の理論からは、主目的の $\delta_s = 0$ や $n = 1$ などは確認されないで、やはり基礎実験の観測を充分に採る必要がある。

なお、多層壁について推論される成果は、 $A = 2^n / \Sigma (x_r^2 / a_r)^n$ であり、恐らく $n = 1$ と思われる。

余白が生じたので Cool down の第3図に対応して Warm up の場合を参考までに掲げておく。



第 9 図