

# 室温の日変化に関する一理論

東 修 三

A theoretical note on the diurnal variation of the room air temperature

Syuzo Azuma

室温の日変化を外気温のそれと比べると、その日平均は高く、日較差は小さく、最高および最低の起時が遅れるのが普通である。室温の日変化に関する多くの理論は、その日変化は外気温のそれに基因するとして展開されているが、この種の理論では、上述の室温の日変化の実状のうち、室温の日平均が外気温のそれより高いことの説明を十分には果せない。著者は本問題の解決には当然日射の効果を導入すべきであると、観点から新しい理論を展開して、上記の日平均に関する問題を含めて室温の日変化を追究した。

## I 緒 言

一般の住宅の場合、室温の日変化は、外気温のそれと比べて、その日平均は高く、日較差は小さく、最高および最低の起時が遅れるのが常態であり<sup>1)2)</sup>、日較差が小さく、最高および最低の起時が遅れるのは、室温の日変化は主として外気温のそれに基因しており、住宅の気候調節作用の現われであるとして、簡単に理論的に説明が可能である。いま、室温を  $\theta$ 、外気温を  $\theta_0$ 、隔壁の面積を  $S$ 、その熱貫流率を  $K$ 、換気量を  $Q$ 、空気の密度を  $\rho$ 、その定圧比熱を  $c_p$ 、室内空気の熱容量を  $M$ 、隔壁のそれを  $M'$ 、時間を  $t$  として、隔壁の熱流を準定常的に取り扱い、隔壁の温度変化を平均的にみて  $\frac{1}{2} \frac{d\theta}{dt}$  であると仮定する<sup>3)</sup>と、室温を制御する式は次のように書くことができる。

$$\left(M + \frac{1}{2}M'\right) \frac{d\theta}{dt} = KS(\theta_0 - \theta) + c_p \rho Q(\theta_0 - \theta) \quad (1)$$

ここで、

$$\eta = \frac{KS + c_p \rho Q}{M + \frac{1}{2}M'} \quad (2)$$

とおくと、(1) 式は

$$\frac{d\theta}{dt} = -\eta(\theta - \theta_0) \quad (3)$$

となるので、外気温の日変化を級数

$$\theta_0 = a_0 + A_1 \sin(\sigma t + \varepsilon_1) + A_2 \sin(2\sigma t + \varepsilon_2) + \dots$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T}, \quad T = 24 \text{ 時間}, \quad t = 0, \quad 0 \text{ 時} \quad (4)$$

で表わすと、室温の日変化を表わす周期解は容易に得られ、次のようになる。

$$\begin{aligned} \theta = & a_0 + \frac{A_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\eta}\right)^2}} \sin\left(\sigma t + \varepsilon_1 - \tan^{-1} \frac{\sigma}{\eta}\right) \\ & + \frac{A_2}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\sigma}{\eta}\right)^2}} \sin\left(2\sigma t + \varepsilon_2 - \tan^{-1} \frac{2\sigma}{\eta}\right) \\ & + \dots \\ & t = 0, \quad 0 \text{ 時} \end{aligned} \quad (5)$$

この理論は、室温の日変化は外気温のそれに比べて、いわゆる1日項（第2項）および半日項（第3項）などの振幅が小さく、それらの位相が遅れること、したがって日較差は小さく、最高および最低の起時が遅れることを示すので、これらのことに関しては一応理論的説明がなされたことになる。しかし、この理論は室温の日平均が外気温のそれより高くなることの説明は与えていない。

この問題に関連して、大井<sup>4)</sup>は室温の日変化におよぼす換気の影響に論及し、換気量が昼間多く夜間少ない実状を取り入れた理論を展開して、室温の日平均が外気温のそれより高くなる結果を得、これを正倉院新宝庫の観測結果の説明に当てている。確かに、昼間と夜間で上述のような換気量の差異があれば、昼間、室温は外気温近くまで高くなろうし、夜間は、室温は外気温ほどまでには低くならないはずであるから、日平均は室温の方が外気温より高くなって当然である。しかし、一般の住宅の場合に、この説明で果して十分かどうかについては、いまだ検討の要があるように思われる。その理由は、もちろん、換気の効果により、上述のように室温の日平均が外気温のそれより高くなるであろうが、この現象は普通には日射その他の熱源の影響によるものと考えられ

ている<sup>1)2)</sup>し、また、室温の日平均と外気温のそれとの差、いわゆる日平均差が、昼夜の換気量の差異が夏季に比べて小さいと思われる冬季においてむしろ大きいという観測事実もある<sup>2)</sup>ので、室温の日平均が外気温のそれより高いことの主因とその説明は、どうしても日射その他の熱源とそれらによる加熱効果に求めなければならぬであろう。

本論文は、このような見地から、特に日射の効果を導入した理論を展開して、上述の室温の日平均が外気温のそれより高くなることの理論的説明を与えること、さらに、この現象以外にも当然室温の日変化に日射の効果が発現することが予想されるので、それがどのように発現するかを検出することも目的として行なった研究の一部を記述したものである。

## II 理 論

本論にはいるに先だち、前節で室温を制御する基本式として採用した(1)式を一応検討しておくこととする。この式は、三浦<sup>3)</sup>がその先駆的論文において提示したもので、問題を簡単化するために、特に、隔壁の熱流を準定常的に取り扱い、隔壁の温度変化を平均的にみて $\frac{1}{2} \frac{d\theta}{dt}$ とするなどの大胆な仮定のもとでたてたものであり、その後、このような簡単化を避け、隔壁の熱流の非定常性を導入した厳密な理論がもちろん提出されている<sup>5)6)7)</sup>。しかし、隔壁の熱流に対する非定常性の導入は理論を相当に複雑化し、その解式は前節の(5)式のような形の表式にはとうてい至らず、その解式をみて室温の日変化の性状を察知したり、また、解式と室温の日変化の調和解の結果とを対比して考察を進めるなどは不可能に近いことである。確かに三浦の隔壁の熱流に対する取り扱い方は大胆で問題の簡単化が幾分過ぎた感がないでもないが、それでも事象の本質は、は握していると思われるし、また、隔壁の熱流そのものを論点にするのではなく、日射の効果を理論的に検出するなどの他の目的にたつ限り、(1)式を室温を制御する基本式として採用し理論展開を試みることも十分意味があり有用であると考えられる。この見地から本論においては(1)式を基本式として用いることとした。

すでに述べたように、本論文の目的は、室温の日平均が外気温のそれより高くなることの理論的説明を与えることを含めて、室温の日変化に日射がどのように影響するかを理論的に追究することで、次にその理論を示す。いま、隔壁の表面温度を $\theta_s$ 、隔壁の表面における日射量を $I$ 、その表面の日射吸収率を $\alpha$ 、この表面における伝導、対流および放射に関する熱伝達係数を $h$ 、隔壁の表

面の受熱量を $q$ とすると、これは次の式で表わすことができる。

$$q = \alpha I + h(\theta_s - \theta_o) \quad (6)$$

この式を

$$q = h(\theta_s - \theta_o) \quad (7)$$

と書きかえると、

$$\theta_s = \frac{\alpha I}{h} + \theta_o \quad (8)$$

となる。この $\theta_s$ は相当外気温<sup>8)</sup>と呼ばれているもので、日射の効果を温度に換算して外気温に加えた仮想的な外気温である。この相当外気温を用い、日射の影響を検知するのが目的であるので一応換気の影響を慮外することになると、室温を制御する式は

$$\left(M + \frac{1}{2}M'\right) \frac{d\theta}{dt} = KS(\theta_s - \theta) \quad (9)$$

となり、

$$\eta = \frac{KS}{M + \frac{1}{2}M'} \quad (10)$$

とおくと、(9)式は

$$\frac{d\theta}{dt} = -\eta(\theta - \theta_s) \quad (11)$$

となり、(3)式で外気温 $\theta_o$ を相当外気温 $\theta_s$ でおきかえた形となる。したがって、相当外気温の日変化を与えて(11)式の周期解を求めれば所期の目的が果せるはずである。相当外気温の関数形を与えるには隔壁の表面における日射量の関数形を仮定しなければならない。いま、日射量を昼間、正弦関数形と仮定し、その最大値を $I_m$ とすると、これは

$$I = \begin{cases} 0 & -\pi < \sigma t < 0 \\ = I_m \sin \sigma t & 0 \leq \sigma t < \pi \end{cases} \quad t=0, 6 \text{ 時} \quad (12)$$

のように表わせ、これをフーリエ級数に展開すると、

$$I = \frac{I_m}{\pi} - \frac{1}{2}I_m \cos \sigma t + \frac{2}{3\pi}I_m \cos 2\sigma t + \dots \quad t=0, 0 \text{ 時} \quad (13)$$

となるので、外気温として(4)式をそのまま用いると、相当外気温は

$$\begin{aligned} \theta_s = & a_0 + \frac{\alpha I_m}{\pi h} + \sqrt{A_1^2 + \frac{\alpha^2 I_m^2}{4h^2} + \frac{A_1 \alpha (-\sin \epsilon_1) I_m}{h}} \\ & \cdot \sin \left( \sigma t + \tan^{-1} \frac{(-A_1 \sin \epsilon_1) + \frac{\alpha I_m}{2h}}{(-A_1 \cos \epsilon_1)} \right) \\ & + \sqrt{A_2^2 + \frac{4\alpha^2 I_m^2}{9\pi^2 h^2} + \frac{4A_2 \alpha \sin \epsilon_2 I_m}{3\pi h}} \\ & \cdot \sin \left( 2\sigma t + \tan^{-1} \frac{A_2 \sin \epsilon_2 + \frac{2\alpha I_m}{3\pi h}}{A_2 \cos \epsilon_2} \right) \end{aligned}$$

$$+ \dots \dots$$

$$t=0, 0 \text{ 時} \quad (14)$$

となる。これに対する(11)式の周期解は容易に得られ、室温の日変化を表わす解式は次のようになる。

$$\theta = a_0 + \frac{\alpha I_m}{\pi h} + \sqrt{\frac{A_1^2 + \frac{\alpha^2 I_m^2}{4h^2} + \frac{A_1 \alpha (-\sin \epsilon_1) I_m}{h}}{1 + \left(\frac{\sigma}{\eta}\right)^2}} \cdot \sin\left(\sigma t + \tan^{-1} \frac{(-A_1 \sin \epsilon_1) + \frac{\alpha I_m}{2h}}{(-A_1 \cos \epsilon_1)} - \tan^{-1} \frac{\sigma}{\eta}\right)$$

$$+ \sqrt{\frac{A_2^2 + \frac{4\alpha^2 I_m^2}{9\pi^2 h^2} + \frac{4A_2 \alpha \sin \epsilon_2 I_m}{3\pi h}}{1 + \left(\frac{2\sigma}{\eta}\right)^2}} \cdot \sin\left(2\sigma t + \tan^{-1} \frac{A_2 \sin \epsilon_2 + \frac{2\alpha I_m}{3\pi h}}{A_2 \cos \epsilon_2} - \tan^{-1} \frac{2\sigma}{\eta}\right)$$

$$+ \dots \dots$$

$$t=0, 0 \text{ 時} \quad (15)$$

この解式で示される室温の日変化を(4)式の外気温のそれと比べてみると、いわゆる平均項(第1項)は  $\frac{\alpha I_m}{\pi h}$  だけ高く、日射の効果として室温の日平均が外気温のそれより明らかに高くなること、しかもその日平均差は日射量に比例して大きくなることがわかるし、また、1日項(第2項)および半日項(第3項)などの振幅は、それぞれ  $\frac{\alpha^2 I_m^2}{4h^2} + \frac{A_1 \alpha (-\sin \epsilon_1) I_m}{h}$  および  $\frac{4\alpha^2 I_m^2}{9\pi^2 h^2} + \frac{4A_2 \alpha \sin \epsilon_2 I_m}{3\pi h}$  などの追加のため、かえって大きくなり得、それらの位相が、それぞれ  $\frac{\alpha I_m}{2h}$  および  $\frac{2\alpha I_m}{3\pi h}$  などの追加のため、かえって進むこともあり得、したがって、日射の影響により室温の日較差が外気温のそれより大きくなり、最高および最低の起時が早まることもあり得る理論結果となっている。

上述の理論により、一般の住宅の場合の室温の日平均が外気温のそれより高くなることに對して、日射の効果としてその理論的説明が果せたことになるが、同時に、日射の影響が室温の日較差、さらに、最高および最低の起時にもおよび、場合によっては一般の住宅についての認識と異なる結果を生ずる可能性をも理論は示唆している。そのような可能性は、たとえば、隔壁の熱容量( $M'$ )が小さく、そのため  $\eta$  が大きく、 $\frac{\sigma}{\eta}$  が小さい場合に期待されることも解式より明らかであるので、隔壁の熱容量が比較的小さいと思われる木造プレハブ小型住宅を試験して別の目的で著者が行なった観測例を用いて理論結果の検証を行なってみることにした。供試した木造プレハブ小型住宅は6畳平家建のいわゆる舟底天井のもので、室温は室中央の床上90cmの高さで、外気温は近くに設置した百葉箱内の地上1.5mの高さで、ともにサー-

ミスター温度計で測定したものである。第1図および第2図は、1967年7月および1968年1月の毎日の室温および外気温の日変化の資料をそれぞれ調解析して、室温の平均項すなわち日平均と外気温のそれとの差、いわゆる日平均差、室温の1日項の振幅の外気温のそれに対する比、すなわち、1日項の振幅比、ならびに室温の1日項の位相角と外気温のそれとの差、すなわち、1日項の位相角差を求め、これらとその日の日射量の目安として採用した6時、8時、10時、12時、14時、16時および18時における水平面日射量の平均値との関係をそれぞれ示したものである。図に用いた記号はその日の天気を表わしたもので、第1表はその分類の説明を示したものである。

第 1 表

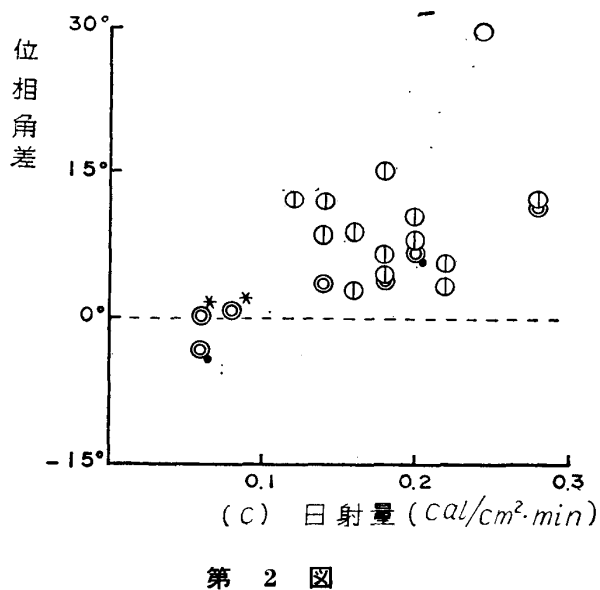
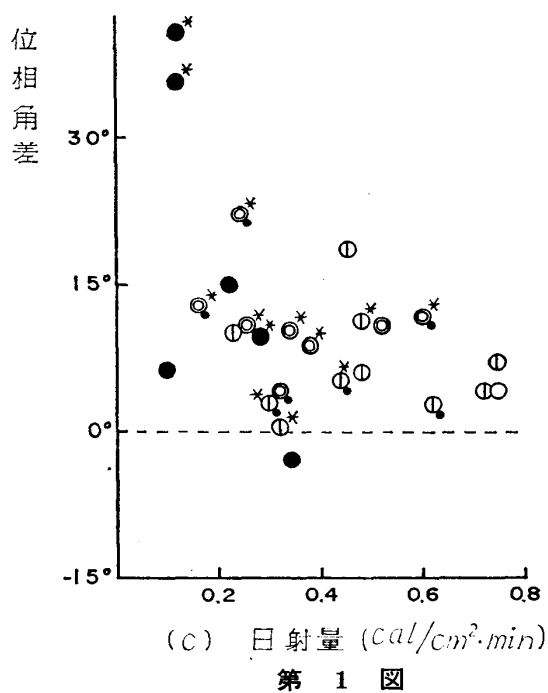
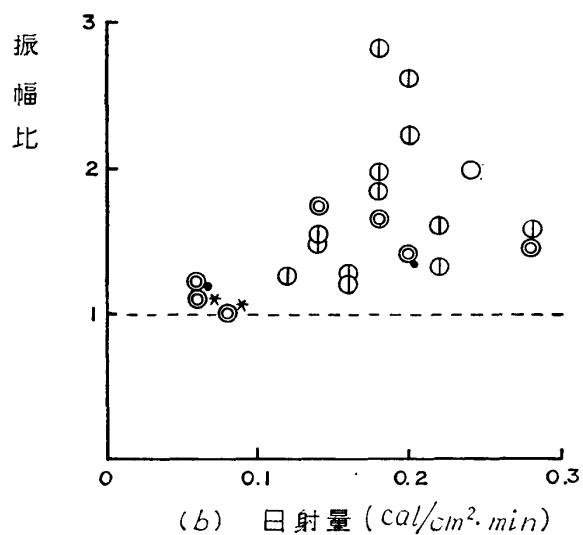
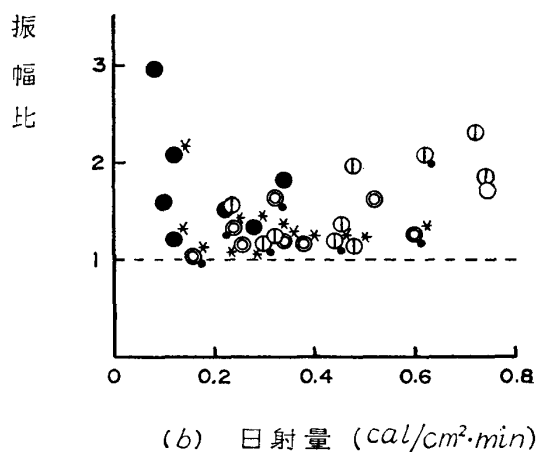
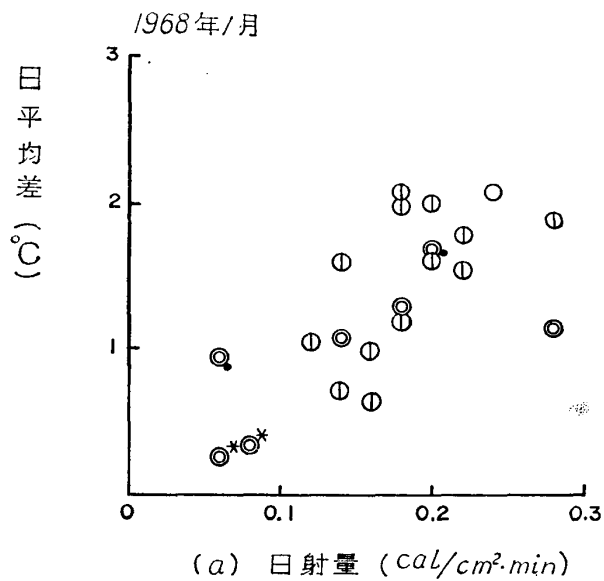
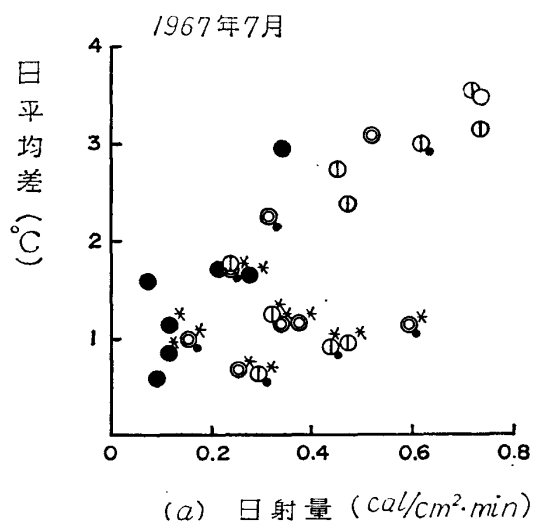
快晴日	日平均雲量 2.4以下	日降水量 0.1mm 未満	○
晴天日	日平均雲量 2.5以上7.4以下	日降水量 0.1mm 以上	①
曇天日	日平均雲量 7.5以上	日降水量 10.0mm 未満	◎
雨天日 <sub>1</sub>	日平均雲量 2.4以下	日降水量 0.1mm 以上	○.
	日平均雲量 2.5以上7.4以下	日降水量 10.0mm 未満	①.
	日平均雲量 7.5以上	日降水量 10.0mm 以上	◎.
雨天日 <sub>2</sub>		日降水量 10.0mm 以上	●

る。また、\*印は昼間窓を開放していた日を示している。これらの図をみると、室温の平均項すなわち日平均は外気温のそれより常に高く、その日平均差については、理論の示すように概して日射量とともに大きくなっており、これはこれでよいのであるが、振幅比はいずれも1より大きく(室温の振幅、したがって日較差が外気温のそれより大きいこと)、位相角差はほとんど正(室温の位相が外気温より進んでいて、したがって最高および最低の起時が外気温のそれらより早いこと)で、いずれも日射の影響として一般の住宅についての認識と異なる結果が生ずる可能性を示唆した理論どおりの結果がみられる。窓を開放していた日の実状は、このような日は日射の影響が緩和されるであろうことを考えれば当然といえる。以上の所論を総合すると、著者の理論は一応所期の目的を果していることになる。

(1969年8月30日受理)

## 文 献

- 1) 田中 貢：衛生工業協会誌，6，464 (1932)
- 2) 庄司 光：空気の科学，續文堂，151 (1943)
- 3) 三浦運一：国民衛生，3，1239 (1926)



- 4) 大井正道：大阪学芸大学紀要・自然科学，**5**，  
32 (1956)
- 5) 前田敏男：日本建築学会論文集，**49**，123 (1954)
- 6) 赤井清康：日本気象学会創立75周年記念論文集，  
138 (1957)
- 7) 堀 竜夫：姫路工業大学 研究 報告，**14**，94  
(1961)
- 8) 久保次郎：気象庁産業気象調査 報告，**24**，49  
(1962)