

RC造建物における間欠暖房時の室温と最大暖房負荷の 集中定数系適用による把握

THERMAL ANALYSIS OF A REINFORCED-CONCRETE BUILDING UNDER INTERMITTENT HEATING BASED ON THE LUMPED CONSTANT SYSTEM

窪田英樹*, 鎌田紀彦**, 鈴木大隆***

Hideki KUBOTA, Norihiko KAMATA and Hirotaka SUZUKI

This paper presents a new approach to predict temperature and heating load of a building with slabs of reinforced concrete under intermittent heating by applying the lumped constant system. The average temperature of the slabs (floors and walls) is used to evaluating the temperature of the building by single value, since the air temperature after heating stopped and the heat load are dependent upon this temperature. In this method, two time constants connected to the heating and cooling processes on slabs are used as a basis for predicting the temperature and heating load. The applicability of this method was tested by computer simulation.

Keywords: Heating, Room temperature, Heating load, Lumped constant, Time constant

間欠暖房、室温変動、暖房負荷、集中定数系、時定数

1. 緒言

最大暖房負荷を、コンピュータシミュレーションによらずに推定する方法として、定常解を基準とする方法や過渡応答の指数項の数を少なくする手法などが提案されている^{2~5)}。室温の変動に関しては、分布定数系を前提とした方法の他に、集中定数系を適用した三浦運一による古典的な方法¹⁾が知られている。仮に、この集中定数系をRC造建物にも適用できるとすれば、最大暖房負荷あるいは室温変動などの過渡現象を極めて明解に把握し得る可能性がある。しかし、集中定数系はRC造建物のような熱容量の大きい建物には適用できない、とされている。外壁や床などのRCスラブ内部の温度は均一ではなく、分布定数系として扱う必要があるからである。しかしながら、一般論としてではなく、対象を表題のように限定した場合には、少し違った側面が見えてくる。

間欠暖房において、室温は、暖房が開始されてから1時間程度の予熱時間を経て設定温度に保持されるが、この「設定室温」は通常は室の空気の温度、あるいは、熱容量の小さい家具などの温度のことを意味する。熱容量の大きい床や壁などRC造の構造体の温度は、設定温度に保持された空気や家具から熱を受け次第に上昇することになる。このときの構造体温度の変化を理解するために、床などに通常用いられる厚さ200mm程度のRCスラブに着目して、両側の気温がステップ状に上昇した場合について理論解析すると、暖房が終了する頃(事務所では暖房開始後10時間前後)には表面と中心の温度の差は、暖房開始時のスラブ温度と設定温度との差の10%程度にまで近接することが判る。一方で、集中定数系とみなして計算したスラブ温度の上昇曲線は、この理論解と比較すると、暖房開

始直後は表面と中心温度のほぼ中間的な値をとり、その後、表面温度に近い値を示す。また、暖房停止時間帯のスラブ内部の温度分布は、暖房終了直前の値よりも小さいことが推定できる。これらのことから、少なくとも、暖房終了直前と暖房開始直前のスラブ温度に関しては、集中定数系を適用する方法でも、よい精度で予測し得る可能性がある、というのが本論文で述べようとする考えである。本論文において、断熱が為されているRC造建物の例について、コンピュータによるシミュレーション結果と集中定数系を適用して得られる解とを比較しており、その結果は、集中定数系とみなす方法でも十分な精度で推定できることを示している。

暖房終了直前と暖房開始直前のスラブ温度が分かれば、最大暖房負荷の算定に加えて、壁や床の放射温度を考慮した体感温度、あるいは、暖房停止時間帯の室温評価がある程度可能となる。

また、集中定数系の特徴である明快さを生かすことができ、初心者が室温変動の概念を学ぶのに有効であるのみならず、設計に先行する計画段階での概算やコンピュータで解析すべき検討項目の範囲を特定したりするのに適用できよう。

本論文は、このような観点から、いわゆる熱的厚壁と考えられている建物に関しても、表題のような限定された課題に対してであれば、集中定数系を適用した近似解法が可能であることを論ずるものであり、無制限に有効性を主張したり、コンピュータ解析の代役をさせるのが本意ではないことはいままでもない。

本論文では、応答の速い気温と変動のゆるやかな構造体の温度を分離して扱うが、実質的な変数はRC造の構造体の温度である。結果として室温変動を三種類の時定数で特徴づけ得ることを示す。

* 室蘭工業大学建設システム工学科 教授・工博

** 室蘭工業大学建設システム工学科 助教授・工博

*** 北海道立寒地住宅都市研究所 博士(工学)

Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Hokkaido Prefecture Cold Region Housing and Urban Research Institute, Dr. Eng.

2. 間欠暖房モデルと集中定数系適用の可能性の検討

通常、外壁や床・間仕切り壁などの温度は異なるが、これらのRC構造体スラブの温度を、それぞれの熱容量、表面積、表面熱伝達抵抗などで重みをつけて平均化して1つのスラブ温度の形で表す。実質的な変数はこの構造体の温度である。本論文では、Fig.1に示すような間欠暖房(暖房時間 τ_h 、暖房停止時間 τ_c ($=24 - \tau_h$))が、土曜・日曜を含めて連日行われている状態を考える。外気温 t_o は一定とする。

床や壁など構造体スラブは、暖房開始後ステップ状に上昇して設定温度に保持されている空気や家具から熱をうけ暖められる。このときのスラブ内部の温度の概要を知るために、室温がステップ状に上昇したときのスラブの表面と中心部の温度上昇の時間変化を示したのが Fig.2 である。同図には、次式で与えられる集中定数系を適用したときの温度上昇も示してある。

$$t_s = t_{s1} + (t_i - t_{s1})\{1 - \exp(-\tau/T)\} \quad (1)$$

(Fig.2においては、 $t_{s1} = 0$ 、 $t_i = 1$)

$$T = c_w R_s (d/2) \quad (2)$$

内部の温度分布の指標となる無次元量 B_i 数は、床や間仕切り壁のようにスラブの両側の室温がステップ状に上昇する場合、RCスラブの厚さ d が200mmで熱伝達抵抗 R_s が0.1程度するとき $B_i=0.5$ となる (Fig.2-a)。集中定数解は、暖房開始直後は理論的に得られる表面と中心部の温度の中間を通して上昇する。実時間を上の横軸に目盛ってあるが、事務所における通常の暖房時間10時間前後においては、集中定数解は理論解の表面温度とほぼ一致し、スラブ中心温度との差も、暖房開始時のスラブ温度と設定室温との差(以後、

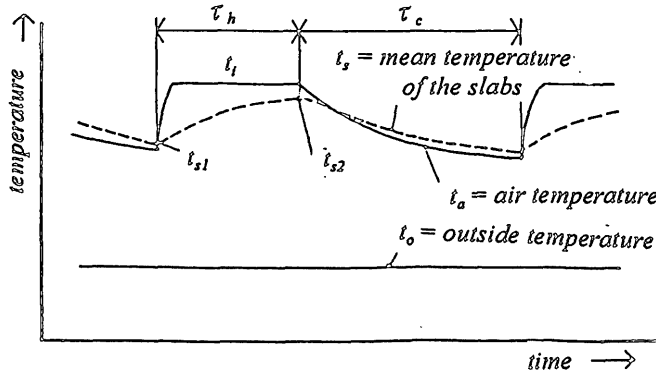


Fig.1 Temperature-time relation for a room under intermittent heating

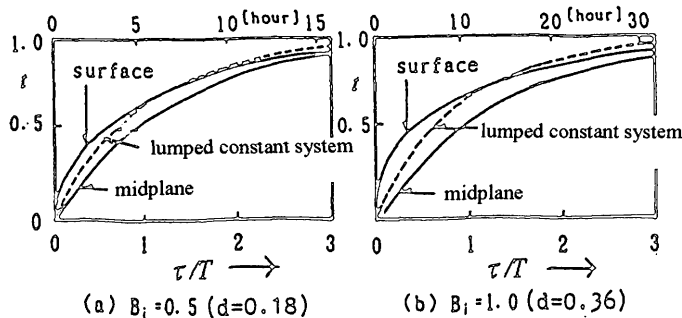


Fig.2 Temperature-time relation for a slab in a step change of air temperature where values of $R_{s1} = 0.11$, $r=0.6$, $c_w = 2 \times 10^6$ are used for the calculation of the time constant T .

初期温度差と称する)の10%程度であることが読み取れる。

また、外側から断熱されている外壁の場合、完全断熱と仮にみなすと B_i 数は約1となる (Fig.2-b)。この場合も、暖房開始10時間後の集中定数解は理論解の表面温度にかなり近く、スラブ中心温度との差も、初期温度差の17%程度であることが読み取れる。初期温度差が仮に10K程度の場合、その17%は2K弱である。

一方、暖房停止時間帯は、外気温がステップ状に低下した場合に対応し、 B_i 数は断熱材の厚さが25mm程度でも0.2程度であり、スラブ内部の温度はほぼ均一とみなすことができよう。

この集中定数系モデルの適用条件を整理すると次のようになる。

- (1) 単室モデルであること(床や壁等の複数のRCスラブ構造体の温度を平均化した単一構造体温度で表現する(本文中の式(A10)、(A11)参照)。(2) 構造体と室空気・家具との熱交換のみを考慮し、構造体相互間の放射熱交換や室内多重反射は無視する。(3) 外気温が暖房時間帯、暖房停止時間帯それぞれ一定温度であること(本論文では終日一定温度としている)。

3. 間欠暖房時の構造体温度

暖房時間中に構造体の温度は t_{s1} から t_{s2} まで上昇し、暖房を停止した後、 t_{s2} から t_{s1} まで降下する。すなわち、暖房時(加熱時)の温度上昇 ($t_{s1} \rightarrow t_{s2}$)と暖房停止時間帯(冷却時)の温度降下 ($t_{s2} \rightarrow t_{s1}$)は等しいことになる。

暖房時: まず、式(1)に $\tau = \tau_h$ と置いて次式を得る。

$$t_{s2} = t_{s1} + (t_h - t_{s1})\{1 - \exp(-\tau_h / T_h)\} \quad (3)$$

ここで、 T_h はスラブ温度が上昇するときの時定数で、Appendix(1)に示す式(A5)、(A8)、(A15)で推定される。また、 t_h は、等価設定室温である(Appendix(1)、式(A13)参照)。

暖房停止時: 暖房が停止すると、建物の温度は外気温へ向かって降下し、次式のように表される。日射や照明などの内部発熱による自然温度差 Δt を考慮する場合は、外気温 t_o を $t_o + \Delta t$ とする (APPENDIX(1)の「2.構造体の冷却」と APPENDIX(3)においても同様である)。

$$t_{s1} = t_o + (t_{s2} - t_o)\exp(-\tau_c / T_c) \quad (4)$$

ここで、 T_c は建物が冷却するときの時定数で、Appendix(1)に示す式(A24)、(A28)、(A32)で推定される。

t_{s1} と t_{s2} に関する式(3)(4)の連立式を解いて、次の結果を得る。

$$(t_{s2} - t_o)(t_i - t_o) = gE_7 \quad (5)$$

$$(t_{s1} - t_o)(t_i - t_o) = gE_7 E_3 \quad (6)$$

スラブ内温度分布が均一(集中定数系)で上記の扱いが可能になる。

4. 間欠暖房時の最大暖房負荷算定への適用

間欠暖房時の熱負荷に関して、次式が荒谷らにより提案されている^{2,7)}。

$$\text{平均暖房負荷 } H_{\tau} = q(t_i - t_o - \Delta t)24p / \tau_h \quad (7)$$

$$\text{最大負荷 } H_{\max} = H_{\tau} n \quad (8)$$

ここで、 Δt : 自然温度差

この方法では、間欠暖房補正係数 (p)、負荷変動係数 (n)と自然温度差 (Δt)の3個の値を選定する必要がある。間欠暖房補正係

数と称される p は、自然温度差 $\Delta t = 0$ の場合、24 時間暖房に対する間欠暖房時の流出熱量の比である。負荷変動係数 n はいわば予熱割り増しであり、1.2~1.3 が提案されている。ここでは、これらの係数を本近似解法を適用して推定するが、本来の p 、 n とは異なるので、それぞれ p' 、 n' と表現することにする。

4.1. 間欠暖房補正係数 p の近似値 (p')

本近似解法を適用することを念頭において、平均暖房負荷 H_r は、下記の負荷を加えたものとする。

(a) 外部に流出する熱量 $\equiv q(t_i - t_o)$

(b) 暖房停止中に冷えた構造体を暖房時間内に回復させるのに要する熱量 $\equiv C_r(t_{s2} - t_{s1})/\tau_h$

従って、平均暖房負荷は次のように表現できる。

$$q(t_i - t_o)24p'/\tau_h = q(t_i - t_o) + C_r(t_{s2} - t_{s1})/\tau_h \quad (9)$$

右辺第二項の構造体を加熱するのに要する負荷は、式 (5)、(6) を代入してつぎのように表される。

$$C_r(t_{s2} - t_{s1})/\tau_h = C_r E_7 E_3 g(t_i - t_o)/\tau_h \quad (10)$$

結局、 p' の値は次式のように表現し得る。

$$p' = (\tau_h + T_c E_7 E_3 g)/24 \quad (11)$$

自然温度差 Δt を考慮した場合も同じ結果が得られる。

4.2. 負荷変動係数の近似値 (n')

最大負荷 H_{max} は、スラブ温度が最も低くなる予熱時間帯に生ずる。ここでは最大負荷を、予熱時間 τ_p 時間が経過して設定室温に達した時点において、構造体へ流入する熱量と外部に流出する熱量とを加えたもの、と定義する。

これを近似的に次式で表すことにする。

$$q(t_i - t_o)24p'n'/\tau_h = q(t_i - t_o) + C_s dt_s/d\tau (\tau = \tau_p) \quad (12)$$

右辺第二項に関する分析を Appendix (3) に示す。この結果を適用することにより、結局 n' は次式で表される。

$$n' = \{1 + g(1 - E_7 E_3)(1 - \tau_p/\tau_h)T_c/T_h\} \tau_h / (24p') \quad (13)$$

自然温度差 Δt を考慮した場合は、 $(t_i - t_o)/(t_i - t_o - \Delta t)$ を上式の {} 内の第 2 項に乗じたものとなり、異なった結果が得られる (「6. 数値解析との比較」参照)。

5. 諸時定数の概略値 (外断熱の例)

5.1 構造体加熱の時定数 T_h : [Appendix (1) 式(A15)]

$$T_h = (C_{si} + C_{so}) / \{A_o(1/R_{oi} + 1/R_{oo}) + A_i/R_i\} \quad (A15)$$

ここで、 $C_{si} = c_w A d_i / 2$ 、 $C_{so} = c_w A d_o$

$$A_o(1/R_{oi} + 1/R_{oo}) + A_i/R_i \approx (A_o + A_i)/R_{si}$$

$$\therefore T_h = c_w d(1/2 + A_o/A_i)R_{si} / (1 + A_o/A_i)$$

上式に $d_i = d_o = 0.2$ m, $c_w = 2 \times 10^6$, $R_{si} = 0.11$ を適用して、下記の概略値が得られる。

$$\therefore T_h \approx 6 \text{ [h]} \cdots \text{中間階中間部 } (A_o/A_i \approx 0) \\ 9 \cdots \text{最上階端部 } (A_o/A_i = 1) \quad (15)$$

5.2 建物冷却の時定数 T_c : [Appendix(1) 式(A32)参照]

$$T_c = C_r/q \quad (A32)$$

ここで $C_r \approx C_s$ 、構造体の熱容量 C_s の概略値は次のようである。

$$C_s = 7.5 \times 10^5 A_f \cdots \text{壁式構造}$$

$$1.5 \times 10^6 A_f \cdots \text{柱・壁式構造}$$

熱損失係数を $q = kA_f$ のようにあらわすと、 k は断熱や気密の程度に対応して $4 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^4$ 程度の値をとる。従って、建物が暖房停止期間中に冷えるときの時定数の概略値は下記ようになる。

$$\therefore T_c = 50 \sim 350 \text{ [h]} \quad (16)$$

5.3 予熱時の室温上昇の時定数 T_a [Appendix(1) 式(A35)]

$$T_a = (c_a V + c_m V) / (q_a + q_w + A_i/R_i + A_o/R_o) \quad (A35)$$

事務室の家具・書籍類に関する熱容量は $C_m = 1.5 \times 10^4$ V 程度とされる⁶⁾。上式に、 $q_a + q_w + A_i/R_i + A_o/R_o \approx (A_i + A_o)/R_i$

$$A_f/(A_i + A_o) \approx 1/3, R_i = 0.11, h_{room} = 2.5$$

を適用して下記の概略値を得る。

$$T_a \approx 0.4 \text{ [h]} \quad (17)$$

6. 数値解析との比較

分布定数系を適用すべきとされている RC 建物に関して、ここで提示した集中定数系適用解と分布系を適用した精密解との間にどの程度の差が生ずるか、比較を試みる。スラブ内部に実際には存在する「温度の分布」を無視して「均一」とみなすことが最も大きい近似であるので、それを浮き彫りにできる単純なモデルが望ましいであろう。計算モデルは、次の 3 種類である (Fig.3)。

(a) 一室モデル (外断熱)、(b) 中間階モデル、(c) 端部モデル

計算は荒谷らによる逐次積分法によった⁸⁾。建物の熱計算に適用した諸条件は以下のようである。

暖房時間 $\tau_h = 9$ (内、予熱 1 時間)、暖房停止時間 $\tau_c = 15$ h、設計室温 $t_i = 1$ °C、外気温度 $t_o = 0$ °C、スラブ厚さ $d_i = d_o = 0.2$ m、スラブの容積比熱 $c_w = 2 \times 10^6$ J/m³K、スラブの熱伝導比抵抗 $r = 0.6$ mK/W、家具熱容量 $C_m = 4.5 \times 10^6$ J/K、 $R_{si} = 0.11$, $R_{so} = 0.04$ m²K/W、窓の熱貫流率 $K_w = 3.5$ W/m²K、換気量 $V_a = 300$ m³/h、建物の面積等：床面積 $A_f = 100$ m²、天井高さ $h_{room} = 3$ m
一室モデル： $A_w = 20$, $A_o = 300$ m²、中間階モデル： $A_w = 10$, $A_o = 20$, $A_i = 290$ m²；最上階モデル： $A_w = 10$, $A_o = 150$, $A_i = 160$ m²,

結果を Table-1 に示す。同表において、構造体温度 t_{s1} 、 t_{s2} に関する集中定数系適用解は、内断熱の場合は解析解の内部スラブ温度と対応しており、外断熱に関しては内部と外周部のスラブの平均温度と対応している。集中定数系適用解と精密解との差は、断熱されている場合、構造体温度に関しては内外気温差の数%以内におさまっていることがわかる。また、間欠暖房補正係数 p の値も、数%の違いである。負荷変動係数の近似値 n' は荒谷が推奨する n 値 (1.2~1.3) よりも多少大きめであるが近い値が得られている。

式 (8) で定義される最大負荷 H_{max} で暖房すれば、気温は式 (A34) のように上昇し、式 (17) で推定される時定数 T_a (≈ 0.4 h) の 3 倍程度の時間、すなわち暖房を開始して約 1 時間程度で設定室温に到達することが期待される。荒谷法における n にも設定温度の変動という表現で、基本的には上記とおなじような考え方が既に指摘されている。しかし n の値は特に、内部発生熱の扱いや設計外気温の選定、さらに始業時の許容室温などを総合的に判断して定められる性質のものであり、計算で一律に定まるものではない。

このように、室温変動や負荷の大きな特徴を把握する上で、ここに提示した近似解法は充分機能する可能性が示されたといえよう。

7. 結言

集中定数系を RC 造の建物に対して適用し、間欠暖房時の室温変動と最大暖房負荷について解析した。その結果、室温変動を支配するのが三つの時定数、すなわち構造体加熱の時定数(T_h)・建物冷却の時定数(T_c)・予熱時間帯の室温上昇の時定数(T_a)であることを示し、具体的な数式で表した。また、荒谷らにより提案されている暖房負荷に関連する係数(間欠暖房補正係数 p 、負荷変動係数 n)をこれらの時定数の関数として表示した。

単純なモデル建物に関しては、集中定数系解はコンピュータによる精密解と十分な精度で一致することを示した。

今後、建物を類型化して、実測データやコンピュータ精密解と当近似解との対応関係を整理することなどが、当近似解法の実用性を高める上で必要と思われる。

この研究は、筆者らが所属する室蘭工業大学校舎の断熱改修(1984~1986年)に伴う室内環境調査がきっかけとなってその発想

を得たものである。調査に御協力頂いた大築教授(現建設システム工学科)並びに施設課の方々に感謝する次第です。

また、荒谷教授(当時北海道大学建築工学科)には負荷算定に係わる基本的な考え方について、落藤教授(同衛生工学科)には、実用化へ向けての具体的課題について懇切なる御教示を賜りました。また、筆者の一人(窪田)が所属した外断熱に関する検討委員会(建築学会北海道支部 1981-83、主査絵内現北大教授)において、多くのご助言を戴きました。ここから感謝する次第です。

関連既発表論文

- 1) 窪田英樹ほか(1986): 室温変動解析における集中定数近似、空気調和・衛生学会道支部第20回学術講演論文集, pp.29-32
- 2) 窪田英樹、鎌田紀彦、鈴木大陸 (1986): 室温変動解析における集中定数近似、室蘭工業大学研究報告理工編第36号, pp.155-163
- 3) 窪田英樹、鎌田紀彦、鈴木大陸(1988): 室温変動解析における集中定数近似、空気調和・衛生学会道支部第22回学術講演論文集, pp.51-54

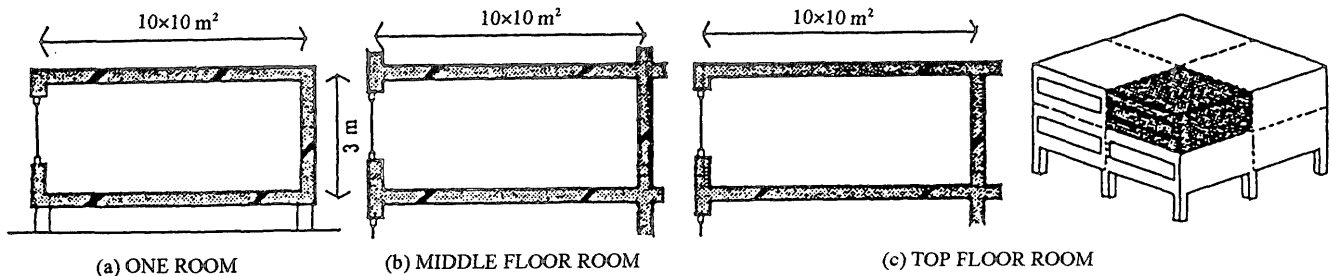


Fig.3 Room models for calculation

Table 1. Comparison of the results by this method and computer simulation

Model	insulation		Temperature						Heating Load					
	position	d	computer simulation				this method		computer		this method			
			outer walls		inner slabs		mean temp.							
			ts1	ts2	ts1	ts2	ts1	ts2	ts1	ts2	P	n	P'	n'
ONE ROOM	OUT	0	0.04	0.48					0.15	0.34	0.46	1.54	0.52	1.21
		25	0.51	0.71					0.52	0.69	0.73	1.47	0.75	1.17
		50	0.63	0.79					0.63	0.77	0.80	1.47	0.81	1.17
		100	0.72	0.85					0.71	0.83	0.85	1.47	0.86	1.17
MIDDLE FLOOR ROOM	IN	25	0.08	0.10	0.84	0.95			0.80	0.96	0.95	1.51	0.92	1.40
		50	0.05	0.06	0.85	0.95			0.81	0.96	0.95	1.52	0.93	1.40
		100	0.03	0.03	0.85	0.96			0.81	0.96	0.95	1.52	0.93	1.41
	OUT	0	0.28	0.37	0.81	0.93	0.74	0.87	0.72	0.88	0.92	1.47	0.87	1.40
		25	0.70	0.79	0.85	0.95	0.83	0.94	0.82	0.96	0.95	1.50	0.93	1.40
		50	0.77	0.86	0.86	0.96	0.85	0.95	0.83	0.97	0.96	1.50	0.93	1.38
		50	0.77	0.86	0.86	0.96	0.85	0.95	0.83	0.97	0.96	1.50	0.93	1.38
		100	0.82	0.91	0.86	0.96	0.86	0.95	0.84	0.97	0.97	1.50	0.94	1.38
TOP FLOOR ROOM	IN	25	0.06	0.10	0.63	0.89			0.57	0.92	0.78	1.60	0.83	1.38
		50	0.04	0.06	0.69	0.91			0.64	0.93	0.83	1.66	0.86	1.37
		100	0.02	0.03	0.73	0.92			0.68	0.94	0.86	1.69	0.88	1.38
	OUT	0	0.13	0.36	0.47	0.83	0.25	0.53	0.40	0.70	0.67	1.51	0.70	1.35
		25	0.60	0.77	0.74	0.92	0.65	0.82	0.68	0.86	0.86	1.51	0.85	1.26
		50	0.71	0.84	0.79	0.94	0.73	0.88	0.75	0.90	0.90	1.51	0.89	1.25
		50	0.71	0.84	0.79	0.94	0.73	0.88	0.75	0.90	0.90	1.51	0.89	1.25
		100	0.78	0.89	0.82	0.95	0.79	0.91	0.80	0.92	0.93	1.51	0.91	1.25

position : Position of insulation materials ;OUT=outside and IN=inside of wall.
 d : Thickness of insulation material in mm.
 ts1 : temperature of the slabs at the beginning of heating
 ts2 : temperature of the slabs at the end of heating
 : values to be compared to those predicted by this method.

引用文献

- 1) 三浦運一、防寒防暑的效果ヨリ見タル本邦各種造家屋比較研究、第一篇、第二篇、国民衛生、1916.5、および1916.9
- 2) 堀江・荒谷・佐々木、間欠暖房負荷の略算法、日本建築学会論文報告集号外、1967-10
- 3) 郡 公子・石野久弥、設計に用いる暖房蓄熱負荷算法の提案、空気調和・衛生工学会論文集、No.31、1986
- 4) 宿谷昌則・伊藤宏、設計用暖房負荷計算のための予熱負荷係数、空気調和・衛生工学会論文集、No.38、1988
- 5) 石野久弥・郡 公子、設計用空調最大負荷の精度に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.43、1990
- 6) 石野久弥・郡 公子、事務所建築における家具類の熱的影響に関する実測・実験研究、日本建築学会論文報告集、No.372、1987
- 7) 荒谷 登ほか、間欠暖房の経済性、日本建築学会大会学術講演会梗概集(中国)、1968
- 8) 荒谷 登ほか、室温変動の逐次積分法、日本建築学会大会学術講演会梗概集(中国)、1968

記号の説明

- A_f, A_w : 床面積、窓の面積 [m²]
 A_i, A_o : 内部および外周部構造体の表面積 [m²]
 B_1 : Biot 数 = $r \cdot (d/2)/R_{si}$ (スラブ両側の室温が上昇する場合) [-]
 c_a, c_w : 空気と構造体の容積比熱 [J/m³K]
 C_a, C_m : 室内空気と家具の熱容量 [J/K]
 C_{si}, C_{so} : 内部と外周部構造体の熱容量 [J/K]
 $C_{si} = c_w \cdot d_o \cdot A_o, C_{so} = c_w \cdot d_i/2 \cdot A_i$
 C_s : 構造体の熱容量 (外断熱 = $C_{si} + C_{so}$, 内断熱 = C_i) [J/K]
 C_r : 建物の熱容量 (= $C_s + C_a + C_m$) [J/K]
 d_i, d_o : 内部および外周部スラブの厚さ [m]
 $E_1 \sim E_7$: 関数
 $E_1 = \exp(-\tau_h/T_h), E_2 = 1 - E_1, E_3 = \exp(-\tau_c/T_c),$
 $E_4 = 1 - E_3, E_5 = E_1 \cdot E_3, E_6 = 1 - E_5, E_7 = E_2/(1 - E_1 \cdot E_3)$ [-]
 g : 構造体加熱に関する設定室温補正 = $(t_h - t_o)/(t_i - t_o)$
 一室モデル : $g = R_{oo}/R_i$ →式(A3)
 内断熱モデル : = 1
 外断熱モデル : $= \frac{A_o / R_{oi} + A_i / R_i}{A_o (1/R_{oi} + 1/R_{oo}) + A_i / R_i}$ →式(A13)
 h_{room} : 室の高さ [m]
 H, H_{max} : 送熱量、最大暖房負荷 [W]
 K_w : 窓の熱貫流率 [W/m²K]
 n, n' : 荒谷による負荷変動係数とその近似値 [-]
 p, p' : 荒谷による間欠暖房補正係数とその近似値 [-]
 q : 熱損失係数(= $q_a + q_w + A_o/R_i$) [W/K]
 q_a : 換気による失熱のコンダクタンス(= $c_a \cdot V_a$) [W/K]
 q_w : 窓からの失熱のコンダクタンス(= $K_w \cdot A_w$) [W/K]
 r : 構造体の熱伝導比抵抗 [mK/W]
 R_{si}, R_{so} : 室内および外気側の表面熱伝達抵抗 [m²K/W]
 R_{ins} : 断熱材の熱抵抗 [m²K/W]
 $R_i = R_{si} + rd_i/4, R_{oi} = R_{si} + rd_o/2, R_{oo} = R_{so} + R_{ins} + rd_o/2$ [m²K/W]

- R_i : 外壁の熱貫流抵抗 (= $R_{oi} + R_{oo}$) [m²K/W]
 t_a : 室温 [°C]
 t_h, t_{hi}, t_{ho} : 構造体加熱に関する等価設定室温 = $t_o + g(t_i - t_o)$ [°C]
 t_i : 設定室温 [°C]
 t_o : 外気温 (一定) [°C]
 t_{s1}, t_{s2} : 暖房開始直前と暖房停止直後の構造体温度 [°C]
 t_{si}, t_{so} : 内部と外周部構造体の温度 [°C]
 t_s : 内部と外周部構造体の平均温度 (外断熱) [°C]
 $= (C_{si}t_{si} + C_{so}t_{so})/(C_{so} + C_{si})$
 T_a : 室温上昇の時定数 [h]
 内断熱モデル : $(C_a + C_m)/(q + A_i/R_i)$
 外断熱モデル : $(C_a + C_m)/(q_a + q_w + A_o/R_{oi} + A_i/R_i)$
 T_h : 構造体加熱の時定数 [h]
 一室モデル : $T_{ho} = C_{so}R_{oi}R_{oo}/(R_iA_o)$
 内断熱モデル : $T_{hi} = C_{si}R_i/A_i$
 外断熱モデル : $T_h = C_s/(A_i/R_i + R_i \cdot A_o/(R_{oi}R_{oo}))$
 T_c : 建物冷却の時定数
 一室モデル : $T_{co} = (C_{so} + C_a + C_m)/q$
 内断熱モデル : $T_c = (C_{si} + C_a + C_m)(R_i/A_i + 1/q)$
 外断熱モデル : $T_c = C_r/q$
 V : 室容積 (= $A_f \cdot h_{room}$) [m³]
 V_a : 換気量 [m³/h]
 τ, τ_p : 経過時間と予熱時間 [h]
 τ_h, τ_c : 一日の暖房時間と暖房停止時間 ($\tau_c = 24 - \tau_h$) [h]
APPENDIX (1) 間欠暖房時のスラブの加熱と冷却過程
1. 暖房時間帯の構造体の加熱
 送熱時間中の室温は常に設定温度 t_i に維持され、構造体はこの空気から熱を受ける。つぎの三つの例について考える。
1.1 一室モデル (外断熱)
 最も単純な例として、Fig.3 に示すようなピロティ型の建物を想定する。構造体は外周部のみに存在し、内部には間仕切り壁はない。外部の構造体の温度 t_{so} に関して次の熱収支式が得られる。
 $C_{so} dt_{so}/d\tau = A_o(t_i - t_{so})/R_{oi} - A_o/R_{oo}(t_{so} - t_o)$ (A1)
 上式を次のように表す。
 $C_{so} dt_{so}/d\tau = (1/R_{oi} + 1/R_{oo})A_o(t_{ho} - t_{so})$ (A2)
 ここで、 $t_{ho} = t_o + R_{oo}/R_i(t_i - t_o)$ (A3)
 上式を次の境界条件で解いて式 (A4) を得る。
 $\tau = 0, t_{so} = t_{so1}, \tau = \infty, t_{so} = t_{ho}$
 $t_{so} = t_{so1} + (t_{ho} - t_{so1})(1 - \exp(-\tau/T_{ho}))$ (A4)
 ここで、 $T_{ho} = C_{so} / \{(1/R_{oi} + 1/R_{oo})A_o\}$ (A5)
1.2 内断熱モデル
 通常の RC 建物において外壁が内断熱されている場合、外壁の熱容量は無視して床や間仕切り壁のみを考慮する。熱収支は次のようである。
 $C_{si} dt_{si}/d\tau = A_i(t_i - t_{si})/R_i$ (A6)
 式(A4)と同様次の解を得る。
 $t_{si} = t_{si1} + (t_i - t_{si1})(1 - \exp(-\tau/T_{hi}))$ (A7)
 ここで、 $T_{hi} = C_{si}R_i/A_i$ (A8)
1.3 外断熱モデル
 室温変動に影響を与える構造体は外部 (外壁) と内部 (床、間仕

切り)がある場合で、式(A2)と式(A6)を加えて次式を得る。

$$C_{so} dt_{so}/d\tau + C_{st} dt_{st}/d\tau = (1/R_{oi} + 1/R_{oo})A_o(t_{ho} - t_{so}) + A_i(t_i - t_{st})/R_i \quad (A9)$$

ここで、構造体の平均温度 t_s を導入する。

$$t_s = (C_{st}t_{st} + C_{so}t_{so})/(C_{so} + C_{st}) \quad (A10)$$

また、つぎの近似を適用する。

$$\{(1/R_{oi} + 1/R_{oo})A_o t_{so} + A_i t_{st}/R_i\} / \{(1/R_{oi} + 1/R_{oo})A_o + A_i/R_i\} \approx (C_{st}t_{st} + C_{so}t_{so})/(C_{so} + C_{st}) \quad (= t_s) \quad (A11)$$

結局、式(A9)は次式のように表される。

$$C_s dt_s/d\tau = \{(1/R_{oi} + 1/R_{oo})A_o + A_i/R_i\}(t_h - t_s) \quad (A12)$$

ここで、

$$t_h = \frac{t_{ho} A_o (1/R_{oi} + 1/R_{oo}) + t_i A_i / R_i}{A_o (1/R_{oi} + 1/R_{oo}) + A_i / R_i} \quad (A13)$$

これを次の境界条件で解く。

$$\tau=0, t_s = t_{s1}, \quad \tau=\infty, t_s = t_h \quad (A14)$$

$$t_s = t_{s1} + (t_h - t_{s1})(1 - \exp(-\tau/T_h)) \quad (A15)$$

2. 暖房停止後の構造体の冷却

暖房停止後の室温は、熱容量の大きい構造体の温度に支配され、ゆるやかに降下する。熱容量の小さい室空気や家具の温度は、速やかに構造体の温度の近くまで降下し、その後、これらの温度は構造体からの熱で構造体の温度よりやや低い温度に保持される。

2.1. 一室モデル

建物からの失熱は、(a) 外壁からの失熱: $A_o/R_{oo}(t_{so} - t_o)$ 、(b) 換気による失熱: $q_a(t_a - t_o)$ 、(c) 窓からの失熱: $q_w(t_a - t_o)$ である。

また、これらの失熱は外周部の構造体と家具・空気の温度降下で賄われる。すなわち、

$$C_{so} dt_{so}/d\tau + (C_m + C_a) dt_a/d\tau = A_o/R_{oo}(t_{so} - t_o) + (q_a + q_w)(t_a - t_o) \quad (A16)$$

熱容量としては構造体が卓越しているので、

$$dt_{so}/d\tau = dt_a/d\tau \quad (A17)$$

と近似できる。また、構造体温度と空気・家具の温度 t_a との差を無視して、室温を構造体の温度 t_s で代表させる。従って、次式のように近似される。

$$C_{ro} dt_{so}/d\tau = q(t_{so} - t_o) \quad (A18)$$

ここで、 $C_{ro} = C_{so} + C_a + C_m$

$$A_o/R_{oo} + q_a + q_w = q \quad (A19)$$

下記の境界条件のもとで次式が得られる。

$$\tau=0, t_{so} = t_{s2}, \quad t_o = \text{一定} \\ \therefore t_{so} = t_{s2} - (t_{s2} - t_o) \exp(-\tau/T_{so}) \quad (A20)$$

$$\text{ここで、} T_{so} = C_{ro}/q \quad (A21)$$

2.2 内断熱モデル

前節と同様に、次の関係式が得られる。

$$C_{st} dt_{st}/d\tau + (C_m + C_a) dt_a/d\tau = (A_o/R_i + q_a + q_w)(t_a - t_o) = q(t_a - t_o) \quad (A22)$$

この式は次式のように表される。

$$C_H dt_{st}/d\tau = q(t_a - t_o) \quad (A23)$$

$$C_H = C_{so} + C_a + C_m \quad (A24)$$

構造体の熱容量が卓越しており、熱の供給はほとんど構造体から

なされるので、次の関係が近似的になりつつ。

$$q(t_a - t_o) = A_i(t_i - t_a)/R_i \quad (A25)$$

したがって、式(A22)は次のように表される。

$$C_H dt_{st}/d\tau = (R_i/A_i + 1/q)(t_{st} - t_o) \quad (A26)$$

この式を解いて次式が得られる。

$$\therefore t_{st} = t_{s2} - (t_{s2} - t_o) \exp(-\tau/T_{ci}) \quad (A27)$$

$$\text{ここで、} T_{ci} = C_H/(R_i/A_i + 1/q) \quad (A28)$$

2.3 外断熱モデル

室温を構造体温度 t_s で代表させ、上式を次のように近似する。

$$C_r dt_s/d\tau = q(t_s - t_o) \quad (A29)$$

$$\text{ここで、} C_r = C_{so} + C_{st} + C_m + C_a \quad (A30)$$

式(A30)を解いて次式が得られる。

$$\therefore t_s = t_{s2} - (t_{s2} - t_o) \exp(-\tau/T_c) \quad (A31)$$

$$\text{ここで、} T_c = C_r/q \quad (A32)$$

APPENDIX (2) 予熱時間帯の室温の上昇

気温が設定温度に達するまでの予熱時間帯は、室空気への熱供給はステップ状に為され、この間の構造体の温度は一定 t_{s1} と仮定する。微小時間内の熱平衡式に次の各項を考慮すると、結局、式(A33)が得られる。

$$\begin{aligned} (a) \quad & \text{換気及び窓からの貫流失熱} && (q_a + q_w)(t_a - t_o) d\tau \\ (b) \quad & \text{構造体への流入 (例として外断熱モデル)} && (A_o/R_{oi} + A_i/R_i)(t_a - t_{s1}) d\tau \\ (c) \quad & \text{空気・家具への蓄熱} && (C_a + C_m) dt_a \\ \therefore & (C_a + C_m) dt_a/d\tau && \end{aligned}$$

$$= H - (q_a + q_w)(t_a - t_o) + (A_o/R_{oi} + A_i/R_i)(t_a - t_{s1}) \quad (A33)$$

これを解いて次式が得られる。

$$(t_a - t_{s1})/(t_i - t_{s1}) = 1 - \exp(-\tau/T_a) \quad (A34)$$

T_a : 室温上昇の時定数

$$= (C_a + C_m)/(q_a + q_w + A_o/R_{oi} + A_i/R_i) \quad (A35)$$

ここで、

$$H = (q_a + q_w + A_o/R_{oi} + A_i/R_i)(t_i - t_{s1}) + (q_a + q_w)(t_{s1} - t_o) \quad (A36)$$

APPENDIX (3) 負荷変動係数の近似値 (n')

式(A12)を式(12)を代入すると、 n' は次式で表される。

$$n' = \{1 + (t_h - t_s)/(t_i - t_o) \cdot C_s/(qT_h)\} \tau_h/(24p) \quad (A37)$$

ここで、 $C_s/q = C_r/q \cdot C_s/C_r = T_c \cdot C_s/(C_s + C_a + C_m)$

$$= T_c(1 - (C_a + C_m)/C_s) = T_c(1 - T_a/T_h) \quad (A38)$$

一方、送熱開始 τ_p 時間後の構造体温度は次式を解いて得られる。

$$dt_s/d\tau = (t_a - t_s)/T_h \quad (A39)$$

ここで、気温 t_a は式(A34)のように上昇するので、 τ_p 時間後の構造体温度は次式のように得られる。

$$t_s = t_{s1} + (t_h - t_{s1}) [1 - \exp(-\tau_p/T_h) - \{1 - \exp(-\tau_p(T_h - T_a)/(T_h T_a))\} \exp(-\tau_p/T_h) T_a/(T_h - T_a)] \quad (A40)$$

ここで次の近似を適用して式(A42)を得る。

$$\exp(-\tau_p/T_a) \times T_a/T_h \approx 0, \quad \exp(-\tau_p/T_h) \approx 1 - \tau_p/T_h \quad (A41)$$

$$t_s(\tau_p) = t_{s1} + (t_h - t_{s1})(\tau_p - T_a)/T_h \quad (A42)$$

この式を、式(A37)に代入して結局次式を得る。

$$n' = \{1 + g(1 - E_3 \cdot E_7)(1 - \tau_p/T_h) T_c/T_h\} \tau_h/(24p) \quad (A43)$$

ここで、 $\tau_p T_a/T_h^2 \approx (T_a/T_h)^2 \approx 0$