

# 回転実験室冷暖房負荷の非定常理論計算と実測

田中辰明  
宮川保之

## 概要

従来、建物の熱負荷算定は定常計算をもとにしているため空調設備容量を決定するために必要な最大負荷をもとめるにとどまり、運転費に関係する年間の必要熱量に関しては非定常熱負荷計算法が確立されていなかったためほとんど行われていない。しかし近年、壁体の非定常熱伝導によって熱負荷をもとめる実用的解法が開発された。これは電子計算用のアルゴリズムの形でそのままプログラミングができるように計算方式が示されており応答係数が用いられているところに特色がある。今回はこの非定常計算法の精度をチェックするため一つのケーススタディとして当研究所の回転実験室を用いて冷暖房負荷を実測からもとめ、一方その日の実測日射量、外気温等を入力として前述の理論から計算した負荷をもとめ両者の比較検討を行なったところ大変よく一致していることが判明した。

## 1. 非定常熱負荷算定の理論

### 1.1. 応答係数 (RESPONSE FACTOR)

図一1に示すように壁体の左側空気に三角形の単位パルスで空気温度が与えられ右側の空気が常時0である場合に左側の表面に起こる熱流をX, 右側の空気に起こる熱流をYとする。同様に逆の励振の場合の熱流応答をZ, Yとする。これらのX, Y, Zの値は時系列で表わされる。これは空気温度の励振に対する表面熱流の応答と定義される。曲線形の外乱を三角波パルスで近似させた場合、図一2のようになりに正確になる。このとき時間間隔  $\Delta t$  を狭くするほど誤差は少なくなる。次に図一3において空気温度が  $\theta(t)$  で変化するとき  $t=n \cdot \Delta t$  として  $\Delta t$  ごとの温度  $\theta_n$  の  $t$  以前の値が全部与えられれば、  $t=n \cdot \Delta t$  における表面熱流は

$$q_0(o, n) = X_0 \theta_n + X_1 \theta_{n-1} + \dots = \sum_{j=0}^{\infty} X_j \cdot \theta_{n-j}$$

壁体内部から反対側表面に向かう熱流は

$$q_0(u, n) = \sum_{j=0}^{\infty} Y_j \cdot \theta_{n-j}$$

同様に右空気温度が時系列表示,  $\phi_n$  で与えられれば

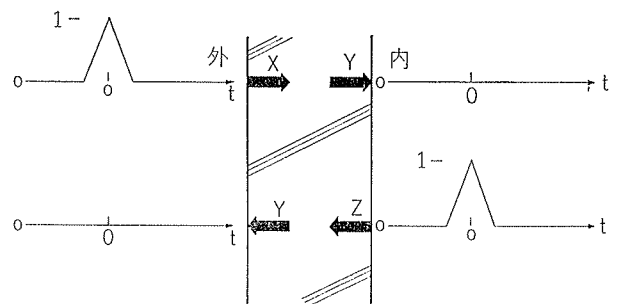
$$q_1(u, n) = \sum_{j=0}^{\infty} Z_j \cdot \phi_{n-j}, \quad q_1(o, n) = \sum_{j=0}^{\infty} Y_j \cdot \phi_{n-j}$$

左表面への流入熱量は

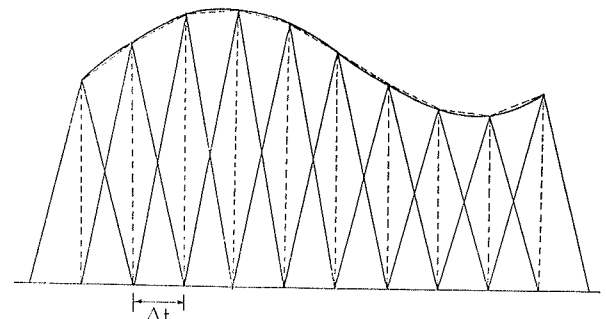
$$q_3, n = \sum_{j=0}^{\infty} X_j \cdot \theta_{n-j} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j \cdot \phi_{n-j}$$

右表面から右側空気への流入熱量は

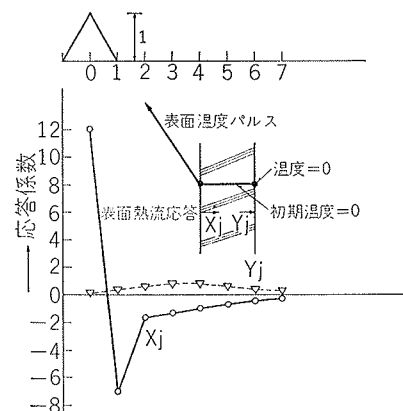
$$q_4, n = \sum_{j=0}^{\infty} Y_j \cdot \theta_{n-j} - \sum_{j=0}^{\infty} Z_j \cdot \phi_{n-j}$$



図一1 空気温度の励振に対する表面熱流の応答



図一2 二等辺三角波による曲線の近似



図一3 三角波パルスに対する応答

一般に室温一定と考えるならば

$$q_{i,n} = \sum_{j=0}^{\infty} Y_j \cdot \theta'_{n-j} \quad (\theta'_j = \theta_j - \text{設定室温})$$

### 1.2. 重み係数 (WEIGHTING FACTOR)

一般に熱取得から冷房負荷に至るまで時間遅れを伴なう。ここで熱取得とは室温一定としたとき外乱によって室内にはいつてくる熱量であり、この熱が一たん床、壁などに吸収され徐々に室内に出てくるものが冷房負荷である。この場合室温は一定と仮定しているわけであるが、実際には一定であり得ない。室温が変動する場合の室内への供給熱量が除去熱量である。

いま時刻  $n$  時以前の熱取得  $HG_j$  が与えられたとき時刻  $n$  時の冷房負荷  $CL_n$  はこの  $HG_j$  と冷房負荷重み係数  $W_j$  との積の級数和で計算することができる。

$$CL_n = \sum_{j=0}^{\infty} W_j \cdot HG_{n-j}$$

この熱取得に対する冷房負荷重み係数は部屋の形態、大きさなどによって異なり第1項から無限大の項までの和がほぼ1になる。

### 1.3. 透過日射に対する冷房負荷重み係数

図-4に示す室内のある平面部材を考え、その空気温度励振に対する両側熱流の応答係数を、 $X_j, Y_j, Z_j$  とした時その部材の初期温度および上下空気温度を  $0$  ( $^{\circ}C$ ) とする。いま時刻  $j=0$  においてガラス窓を透過してふく射の形で室内表面に入射する単位のエネルギーが三角波パルスで与えられたとする。表面Aの輻射熱吸収率を  $a$ 、総合熱伝達率を  $\alpha_A$  とするならば両表面の境界層を含むコンクリート板に対して相当気温の概念を用いると、 $1/\alpha_A$  ( $^{\circ}C$ ) の入力を与えられたとすることができる。そこで  $Z_j$  の応答係数を用いれば  $1$  ( $Kcal/m^2 \cdot h$ ) の三角波パルスに対してその時刻に現われる冷房負荷は  $1 - aZ_0/\alpha_A$  となり、一般に  $j$  時間後 ( $j \geq 1$ ) には  $-aZ_j/\alpha_A$  が冷房負荷になる。多層建築の場合は天井コンクリート板の上表面にも日射があたっているので、

$$WG_{1,0} = 1 - a(Z_0 - Y_0)/\alpha_A, \quad WG_{1,j} = a(Y_j - Z_j)/\alpha_A \quad (j \geq 1)$$

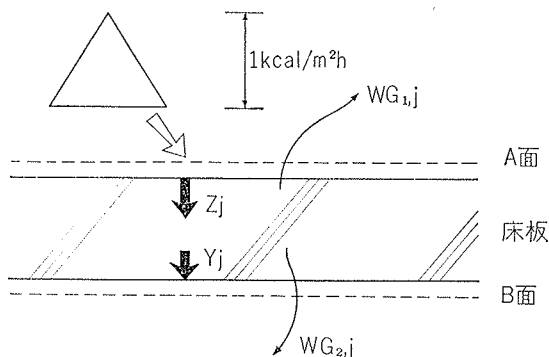


図-4 日射励振に対する熱流応答

### 1.4. 室温変位に対する除去熱量重み係数

室温がある時に  $ldeg$ , パルスのように上昇したとき、そのスペースから熱がどのように逃げていくかを時系列で表わし、この符号を逆にしたものを室温変位に対する除去熱量重み係数  $WT_j$  ( $Kcal/h \cdot deg$ ) と定義する。この時点 ( $n=0$ ) において部屋の周囲の各単位面積あたり  $Z_0$  と表面積の積の合計  $\sum Z_0 S$  と、ガラス等の貫流流出熱、すきま風×比熱の合計  $\sum KS'$  と、室内に存在する熱的に薄いと考えられるもの (家具、室内空気) の熱容量に相当する吸熱の合計  $\sum Q$  との熱が流出し外気に面する以外の面から  $\sum Y_0 \theta_0 S''$  ( $\theta_0$  は  $n=0$  における隣室の室温上昇度  $^{\circ}C$ ,  $S''$  は隣室に接する周壁の表面積) が流入する。  $WT_j$  は次のようになる。

$n=0$  のとき、

$$WT_0 = -(\sum Z_0 S + \sum KS' + \sum Q - \sum Y_0 \theta_0 S'')$$

$n=1$  のとき、

$$WT_1 = -(\sum Z_1 S - \sum Q - \sum Y_1 \theta_0 S'' - \sum Y_0 \theta_1 S'')$$

$n \geq 2$  のとき

$$WT_n = -\{\sum Z_n S - \sum_{j=0}^n (\sum Y_j \cdot \theta_{n-j} \cdot S'')\}$$

室温変動による蓄熱負荷  $SL_n$  は室内設定温度を  $\theta_R$ , 実際の変動する室温を  $\theta_{RC}$  とすれば次のようになる。

$$SL_n = \sum_{j=0}^{\infty} WT_j \cdot (\theta_{RC, n-j} - \theta_R)$$

$\theta_j$  は通常  $\theta_0=1, \theta_1, \theta_2, \dots=0$  であるが隣室も空調されている場合は  $\theta_0$  も  $0$  である。

## 2. 回転実験室冷暖房負荷の計算と実測との比較

### 2.1. 比較方法

回転実験室を夏季には東に向け、冬季においては南側に向けて1週間程度連続運転を行ない冷暖房負荷の実測をあらかじめ行ない、一方その日の実測日射量、外気温等を入力として重み係数法によって除去熱量を計算からもとめ両者の比較を行なった。計算は時間間隔を細かくすればするほど正確になるが膨大な計算量となる。そこで夏季においては15分間隔とし電算機を用い、冬季においては1時間間隔の手計算とした。

### 2.2. 計算方法

2.2.1. 窓面の日射熱吸収による熱取得 ( $HG_1$ ) ・冷房負荷 ( $CL_1$ ) 図-5に示すように窓面において熱平衡式をたてる。

$$I_{VD,n} \cdot (A_1 - S_n) \cdot a_D + I_{VD,n} \cdot A_1 \cdot a_d + \{EA_n + EG_{1,n} + EG_{2,n} - EO_n - CO_n - CR_n\} \cdot A_1 = 0$$

ここに  $EA_n = \varepsilon_g \cdot \varphi_{ag} \cdot C_b \cdot (T_{a,n}/100)^4 \cdot (0.51 + 0.076$

$$\cdot \sqrt{f}), EO_n = \varepsilon_g \cdot C_b \cdot (T_{g,n}/100)^4, CO_n = \alpha_0 \cdot (\theta_{g,n} - \theta_{a,n}), CR_n = \alpha_R \cdot (\theta_{g,n} - \theta_R)$$

$$EG_{1,n} = \varepsilon_g \cdot \varepsilon_c \cdot \varphi_{sg} \cdot C_b \cdot (T_{e,n}/100)^4$$

$$EG_{2,n} = \varepsilon_g \cdot \varepsilon_f \cdot \varphi_{fg} \cdot C_b \cdot (T_{f,n}/100)^4$$

この熱平衡式を反復法によって解き、 $\theta_{g,n}$ をもとめれば  $HG_1$  は、 $HG_{1,n} = (\theta_{g,n} - \theta_R) \cdot \alpha_R \cdot A_1$  となりこれがそのまま  $HG_{1,n} = CL_{1,n}$  となる。手計算の場合は次式に示す簡略解によった。

$$HG_{1,n} = (\theta_{a,n} - \theta_R) \cdot K \cdot A_1 + I_{VD,n} \cdot (A_1 - S_n) \cdot \alpha_D \cdot$$

$$\frac{\alpha_R}{\alpha_0 + \alpha_R} + I_{VD,n} \cdot S_n \cdot \alpha_d \cdot \frac{\alpha_R}{\alpha_0 + \alpha_R}$$

### 2.2.2. ガラス透過日射による熱取得 ( $HG_2$ ), 冷房負荷 ( $CL_2$ )

$$HG_{2,n} = I_{VGD,n} \cdot (A_1 - S_n) + I_{VGD,n} \cdot A_1$$

$$CL_{2,n} = \sum_{j=0}^{\infty} WG_j \cdot HG_{2,n-j}$$

ここに  $WG_0 = 1 - \alpha_c Z_0 / \alpha_A$ ,

$$WG_j = -\alpha_c Z_j / \alpha_A \quad (j \geq 1)$$

$S_n$  は各時刻の太陽高度、方位角からとめる。

### 2.2.3. サッシュからの熱取得 ( $HG_3$ ), 冷房負荷 ( $CL_3$ )

サッシュについては室内空気に向するサッシュ面積をもとめ内表面温度をはかった。

$$HG_{3,n} = \alpha_S \cdot (\theta_{S,n} - \theta_R) \cdot A_3 = CL_{3,n}$$

### 2.2.4. ガードルームからの熱取得 ( $HG_4$ ), 冷房負荷 ( $CL_4$ )

ガードルームの壁体表面温度と実験室とで温度差が生じていたのでガードルームからの熱取得も計算しなければならない。

$$HG_{4,n} = \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} Y_j \cdot (\theta_{b,n-j} - \theta_R) \right\} \cdot A_4 = CL_{4,n}$$

### 2.2.5. 室温変位による除去熱量 ( $HR$ )

$$HR_n = \sum_{j=0}^{\infty} WT_j \cdot (\theta_{RC,n-j} - \theta_R)$$

$WT_j$  は1.4の式において隣室(ガードルーム)も空調されているので、 $\theta_0, \theta_1, \dots = 0$  となるので次のようになる。

$$WT_0 = -(Z_0 \cdot A_1 + K \cdot A_1 + Q)$$

$$WT_1 = -(Z_1 \cdot A_4 - Q)$$

$$WT_j = -Z_j \cdot A_4 \quad (j \geq 2)$$

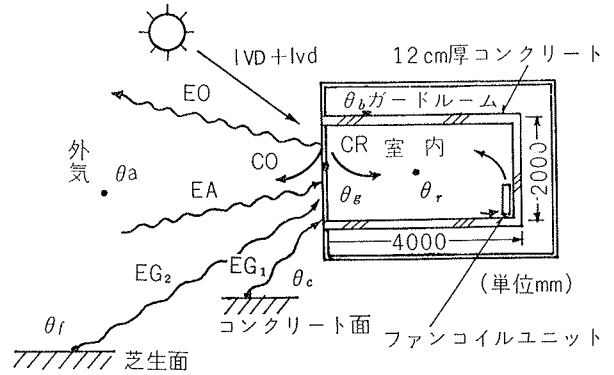
### 2.2.6. 全冷房負荷 ( $CL_n$ ), 全除去熱量 ( $HE_n$ )

$$CL_n = CL_{1,n} + CL_{2,n} + CL_{3,n} + CL_{4,n}$$

$$HE_n = CL_n + HR_n$$

### 2.3. 実測との比較

計算結果を実測値と比較して夏季東側の場合を図一6に、冬季南側の場合を図一7に示す。図中の実線はカロリーメータによる実測値であり、破線は計算値で



図一5 窓面での熱収支

実測値は実線を引いて示す

$I_{VD} I_{VD}$  ; 屋外垂直面直達、拡散日射量 ( $Kcal/m^2 \cdot h$ )

$I_{VGD}, I_{VGD}$  ; ガラス透過垂直面直達、拡散日射量 ( " )

$\alpha_D, \alpha_d$  ; 直達、拡散日射に対するガラスの吸収率

$EG_1, EG_2$  ; ガラス面とコンクリート面、芝生面との低温ふく射量 ( $Kcal/m^2 \cdot h$ )

$EA$  ; 天空からガラス面への低温ふく射量 ( $Kcal/m^2 \cdot h$ )

$EO$  ; ガラス面から天空への低温ふく射量 ( " )

$CO$  ; ガラス面から外気への伝達熱量 ( " )

$CR$  ; ガラス面から室内への伝達熱量 ( " )

$f$  ; 外気水蒸気圧 (mmHg)

$C_b$  ; 黒体のふく射定数 ( $4.88 Kcal/m^2 \cdot h \cdot K^4$ )

$\varepsilon_g, \varepsilon_c, \varepsilon_f$  ; ガラス面、コンクリート面、芝生面のふく射定数 (0.95)

$\varphi_{ag}, \varphi_{cg}, \varphi_{fg}$  ; ガラス面の天空、コンクリート面、芝生面に対する形態係数 (0.5, 0.25, 0.25)

$\alpha_o, \alpha_r$  ; ガラス外表面対流、内表面総合熱伝達率 ( $15, 8 Kcal/m^2 \cdot h \cdot deg$ )

$\alpha_a, \alpha_s$  ; コンクリート面、サッシュ面から室内への総合熱伝達率 ( $8 Kcal/m^2 \cdot h \cdot deg$ )

$A_1, A_2, A_3, A_4$  ; ガラス面積、窓全面積、サッシュ面積、コンクリート板合計面積 ( $7.52, 8, 0.67, 56 m^2$ )

$S$  ; サッシュによってガラス面に生じる面積 ( $m^2$ )

$K$  ; ガラスの熱貫流率 ( $5.02 Kcal/m^2 \cdot h \cdot deg$ )

$\theta_g, \theta_a, \theta_s$  ; ガラス、外気、サッシュ温度 (deg)

$\theta_c, \theta_f$  ; コンクリート面、芝生面温度 (deg)

$\theta_b$  ; ガード側コンクリート表面平均温度 (deg)

$\alpha_c$  ; コンクリートの熱吸収率 (0.8)

$\theta_r, \theta_{rc}$  ; 設定室温、実際の室温 (deg)

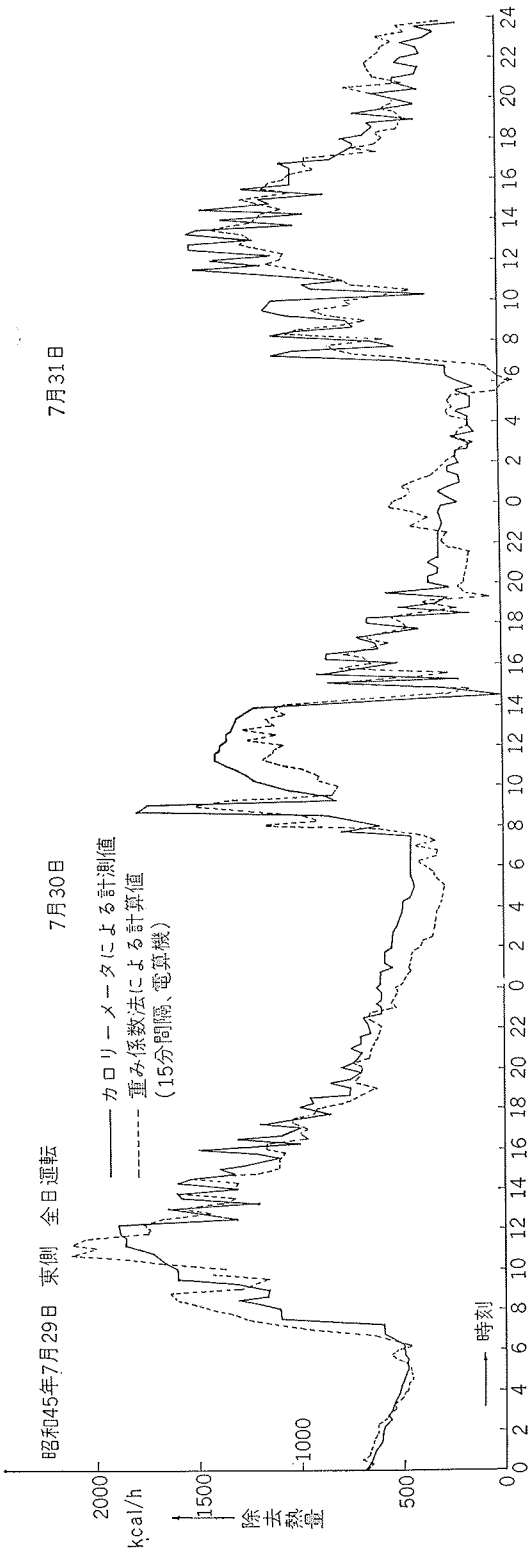
$X_j, Y_j, Z_j$  ; 室内側境界層も含めたコンクリート板の応答係数 ( $Kcal/m^2 \cdot h \cdot deg$ )

$WG_j$  ; 日射熱取得に対する冷房負荷重み係数

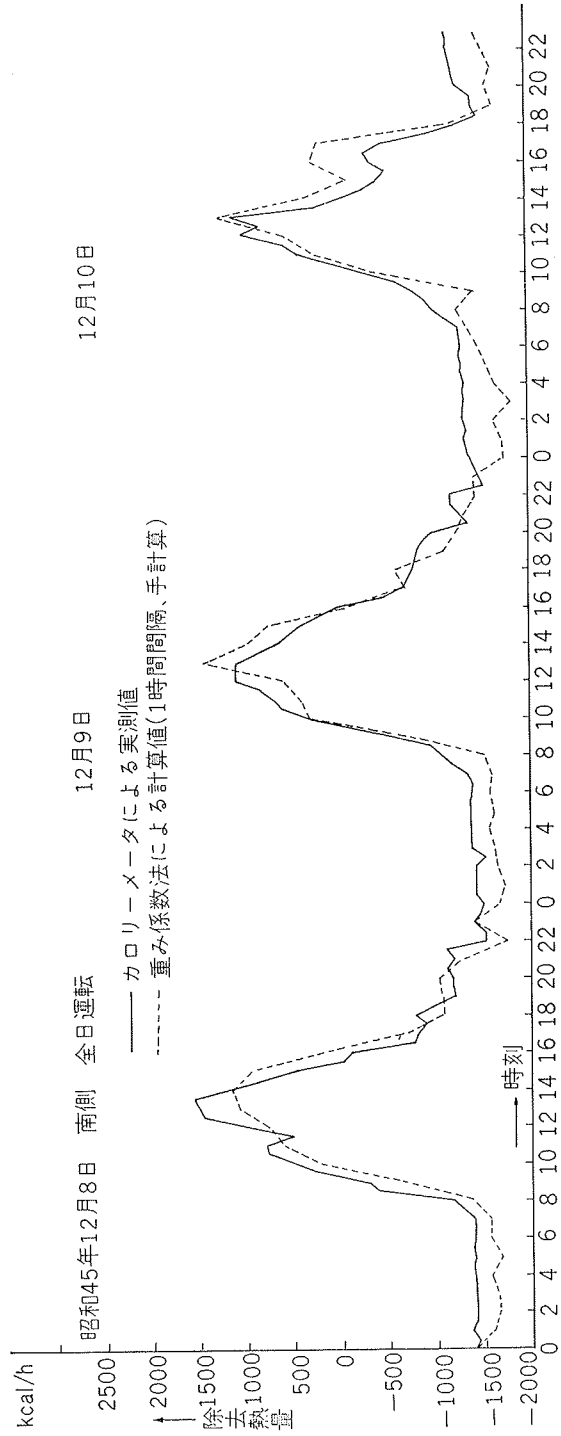
$WT_j$  ; 室温変位に対する冷房負荷重み係数

$Q$  ; 室内にあるファンコイルユニットの熱容量 ( $Kcal/deg$ )

表一1 計算式中の記号



図一6 理論計算と実測との比較 (夏季, 東側)



図一7 理論計算と実測との比較 (冬季, 南側)

| j  | $\Delta t = 0.25 \text{ h}$ |          | $\Delta t = 1 \text{ h}$ |            |             |
|----|-----------------------------|----------|--------------------------|------------|-------------|
|    | Yj                          | Zj       | Xj                       | Yj         | Zj          |
| 0  | 0.07200                     | 7.11460  | 5.06062424               | 0.09618903 | 8.71871960  |
| 1  | 0.15149                     | -0.61760 | -0.64066806              | 0.55870223 | -1.88378873 |
| 2  | 0.57899                     | -0.35903 | -0.37121597              | 0.57757584 | -0.99971612 |
| 3  | 0.65164                     | -0.26529 | -0.27157773              | 0.44194180 | -0.72533983 |
| 4  | 0.58394                     | -0.20932 | -0.20240566              | 0.33056937 | -0.54026151 |
| 5  | 0.49107                     | -0.16896 | -0.15108075              | 0.24681742 | -0.40324287 |
| 6  | 0.40492                     | -0.13744 | -0.11278439              | 0.18425776 | -0.30102636 |
| 7  | 0.33174                     | -0.11210 | -0.08419631              | 0.13755319 | -0.22472346 |
| 8  | 0.27121                     | -0.09151 | -0.06285466              | 0.10268692 | -0.16776169 |
| 9  | 0.22157                     | -0.07423 | 共通比 0.74652512           |            |             |
| 10 | 0.18097                     | -0.06102 |                          |            |             |
| 11 | 0.14780                     | -0.04983 |                          |            |             |

共通比 0.81667

表-2 コンクリート板(12cm)の応答係数

ある。また表-1にこの章の計算式で用いた記号表を、表-2にコンクリート板の応答係数を、表-3に各熱取得に対する冷房負荷重み係数を示す。

#### 2.4. 考察

全日運転時の計算においては時間間隔を15分程度とするならばかなり正確な冷暖房負荷が計算できることが判明した。図-6における計算による一日の総熱量の誤差は実測値に比較して7月29日においては、8.2%大きく7月30日では1.5%小さく7月31日では7.7%大きくなっている程度である。

時間間隔を1時間とした場合は日射等の外乱が急激に変動するところでは計算が不正確となる。また窓面からの負荷(CLi)を算出する際、大気ふく射・地物とのふく射等を考慮した厳密解でなくとも、手計算が可能な簡略解で十分であると思われる。しかし手計算では全体的に時間がかかりすぎる欠点がある。

さらに本文中にはのせていないが、間欠運転時の冷暖房負荷を正確に計算する場合は15分間隔の三角波励

| j | WGj<br>( $\Delta t = 1 \text{ h}$ ) | WGj<br>( $\Delta t = 0.25 \text{ h}$ ) | WTj<br>( $\Delta t = 0.25 \text{ h}$ ) |
|---|-------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 0 | 0.384                               | 0.4960                                 | -544                                   |
| 1 | 0.133                               | 0.0437                                 | 125                                    |
| 2 | 0.071                               | 0.0254                                 | 56                                     |
| 3 | 0.051                               | 0.0187                                 | 40                                     |
| 4 | 0.038                               | 0.0148                                 | 30                                     |
| 5 | 0.029                               | 0.0120                                 | 23                                     |
| 6 | 0.021                               | 0.0097                                 | 17                                     |
| 7 | 0.016                               | 0.0079                                 | 13                                     |
| 8 | 0.012                               | 0.0065                                 | 9                                      |

表-3 各熱取得に対する冷房負荷重み係数

振に対する応答ではまだ不十分であり、さらに時間間隔を細かくするか、予熱(冷)時のみ、く形波励振、直角三角波励振を用いなければならない。

#### 3. おわりに

本研究に当たって早大助教授、木村建一氏から多大の御指導を受けた。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 木村建一: ASHRAEの年間空調負荷計算法, 空気調和・衛生工学, Vol. 44, No.4
- 2) 石野久弥: 高層建築の年間空調負荷に関する試算例, 空気調和・衛生工学, Vol. 44, No.12
- 3) 木村・田中・宮川: 透過日射に対する冷房負荷重み係数の実測, 空気調和・衛生工学, Vol. 45, No.1
- 4) 木村・田中・石野・宮川: 回転実験室空調除去熱量の実測結果と重み係数法によるシミュレーション結果との比較, 日本建築学会大会論文要旨集 1971