

等価重み係数法による回転実験室冷暖房負荷の解析

宮川 保之

Cooling and Heating Calculations on Revolving Air Conditioning Test Room Using Equivalent Weighting Factor Method

Yasuyuki Miyakawa

Abstract

The response factor method is effective for cooling load calculations in deciding the capacity of an air conditioning system. However, it is too complex for cooling load calculations for air conditioning system control of an existing building using a computer. For such calculations there is an equivalent weighting factor method which grasps the thermal system in a room macroscopically. Room temperature and cooling load can be predicted by means of this method based on actual past measurement data. In the present study, an examination was made of the accuracy of this equivalent weighting factor method. Examinations were also made of the difference equations method dividing the concrete members surrounding the room and of a newly defined differences equation method using radial air temperature.

概 要

非定常熱負荷計算法として、これまで応答係数法についてその理論の精度の検証を行ってきたがこの方法は設計用熱負荷計算には有効であるが、実存建物の空調システムのコンピュータによるオン・ライン・コントロールのための熱負荷計算には複雑すぎる欠点がある。このための一手法として建物熱的系をマクロ的にとらえて過去の実測データより室温・負荷の予測をする等価重み係数法がある。今回は当研究所の回転実験室を用いてこの等価重み係数法の検証を行なった。また従来からある室内を囲む部材を分割する階差方程式法、新たに定義した輻射気温を用いた階差方程式法等についても検証を行なった。また各方式によって非空調時の日射・外気温等による自然室温の算定式を誘導したので、今後、供給熱量一定の暖房時の室温変動、暖房停止後の室温変動も容易に算出できる。

1. 非定常熱負荷算定法

1.1. 時系列重み係数法 (WF法)

これは室温励振のレスポンスファクターを利用する計算法である。計算時間間隔は1時間および30分とした。なお外乱としては外気温、ガラス透過垂直面日射量、夜間輻射量、隣室(ガードルーム)温度の4つであり、これは以下1.3.まで同じである。未知数は空調時においては除去熱量、非空調時においては室温とした。

1.1.1. ガラス透過による熱取得 垂直面透過日射

量はエプリア日射計によって測定しているため短波長の輻射成分(95%)のみである。そこで室内に流入する全日射量をもとめ、そのうちの96%が輻射成分であるとする

$$I_{VGT,n} = A_1 \times I_{VG,n} / 0.95$$

$$I_{VGR,n} = 0.96 \times I_{VGT,n}$$

$$CL_{1R,n} = \sum_{j=0}^{\infty} WG_j \times I_{VGR,n-j}$$

室内に流入する全日射量のうち2%が対流成分であると考え

$$CL_{1C,n} = 0.02 \times I_{VGT,n}$$

$$CL_{1,n} = CL_{1R,n} + CL_{1C,n}$$

1.1.2. ガラス貫流熱取得 相当外気温度差 θ_e は次式で示される。

$$\theta_{e,n} = \theta_{0,n} - \varepsilon_g \cdot \varphi_a \cdot S_{NH,n} / \alpha_0 - \theta_{r,n}$$

$$CL_{2,n} = A_2 \times K_g \times \theta_{e,n}$$

1.1.3. 内壁貫流熱取得

$$CL_{3,n} = A_3 \times \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} Y_j \times \theta_{a,n-j} - \sum_{j=0}^{\infty} Z_j \times \theta_{r,n-j} \right\}$$

1.1.4. 室内に蓄熱される熱量

$$QR_n = \frac{d\theta_r}{dt} \times FC$$

$$= FC \times (\theta_{r,n} - \theta_{r,n-1}) / \Delta t$$

1.1.5. 全除去熱量

$$HE_n = CL_{1,n} + CL_{2,n} + CL_{3,n} - QR_n$$

1.1.6. 非空調時の室温算定式

$$\theta_{r,n} = \left\{ CL_{1,n} + A_2 \times K_g \times (\theta_{0,n} - \varepsilon_g \cdot \varphi_a \cdot S_{NH,n} / \alpha_0) \right. \\ \left. + A_3 \times \left(\sum_{j=0}^{\infty} Y_j \times \theta_{a,n-j} - \sum_{j=1}^{\infty} Z_j \times \theta_{r,n-j} \right) + (FC \times \theta_{r,n-1} / \Delta t) \right\} + (A_3 \times Z_0 + A_2 \times K_g + FC / \Delta t)$$

なお室内側熱伝達率

α_A は一定としてその値は、 $10 \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$ とした。WG_j の算定は次式によった。

j=0 のとき

$$WG_0 = 1 - aZ_0 / \alpha_A$$

1 ≤ j ≤ 11 のとき

$$WG_j = -aZ_j / \alpha_A$$

j ≥ 12 のとき

$$WG_j = C \times WG_{j-1}$$

C; 共通比

$$C = \frac{1 - WG_{11}}{1 - a \times K_w / \alpha_A - \sum_{j=0}^{10} WG_j}$$

1.2. 時系列応答係数法 (RF法)

これは内表面温度励振のレスポンスファクターを使用している。隣室側境界層は含んでいる。未知数は除去熱量、室温のほか壁体内表面 (室内側表面) 温度である。

1.2.1. ガラス透過日射による熱取得 WF法と同様であるが瞬時負荷としては対流成分と輻射成分のうちの30%とする。他は壁面に吸熱されると考える。

- IVG ; ガラス透過垂直面全日射量 (短波長のみ, エブリ日射計測定値, Kcal/m²·h)
- IVGT, IVGR ; ガラス透過垂直面全日射量, およびその輻射分 (短波長+長波長, Kcal/m²·h)
- S_{NH} ; 水平面夜間輻射量 (Kcal/m²·h)
- Θ_o, Θ_a, Θ_r; 外気温, ガードルーム温度, 室温 (deg)
- Θ_w, Θ_{re} ; 壁体内側表面温度, 相当輻射気温 (deg)
- Θ_e ; 相当外気温度差 (deg)
- ε_g, ε_w ; ガラス, コンクリートの輻射率
- γ_a ; ガラスの天空に対する形態係数
- a ; コンクリートの熱吸収率 (0.7)
- a' ; コンクリートの温度拡散率 (m²/S)
- α_A, α_C, α_r ; コンクリートの総合, 対流, 輻射熱伝達率 (10および4~6, 4 Kcal/m²·h·°C)
- α_o ; ガラスの外表面熱伝達率 (20Kcal/m²·h·°C)
- α_i, α_{ic}, α_{ir}; ガラスの内表面総合, 対流, 輻射熱伝達率 (Kcal/m²·h·°C)
- K_g ; ガラスの熱貫流率 (5.5Kcal/m²·h·°C)
- K_w ; 内壁の熱貫流率 (3.22Kcal/m²·h·°C)
- F_c ; 室内器具熱容量 (25.6 Kcal/°C)
- Δt ; 計算時間間隔 (h)
- A₁, A₂, A₃ ; ガラス実質, 窓, 内壁全面積 (7.46, 8.00, 59.40 m²)
- X, Y, Z ; 壁体両側境界層も含んだ応答係数
- X', Y', Z' ; 壁体隣室側境界層のみを含んだ応答係数
- WG_j ; ガラス透過日射に対する冷房負荷重み係数
- HG₁ ; ガラス透過日射による熱取得 (Kcal/h)
- CL₁ ; " 冷房負荷 (")
- CL_{1C} CL_{1R} ; " 冷房負荷のうち対流分, 輻射分 (Kcal/h)
- CL₂ ; ガラス貫流による冷房負荷 (Kcal/h)
- CL₃ ; 内壁 " (")
- QR ; 室内に蓄熱される熱量 (")
- HE ; 室内全除去熱量 (")
- C, γ, λ ; コンクリートの比熱, 比重, 熱伝導率
- k ; 時刻

j	WFj
0	0.42099
1	0.07913
2	0.04261
3	0.03175
4	0.02622
5	0.02245
6	0.01946
7	0.01693
8	0.01475
9	0.01285
10	0.01120
11	0.00976
共通比	0.87159

表-1 ガラス透過日射に対する冷房負荷重み係数 (Δt=0.5h) (α_A=10)

表-2 記号表

瞬時負荷 $CL_{1s,n}$ は

$$CL_{1s,n} = 0.02 \times I_{VGT,n} + 0.3 \times 0.96 \times I_{VGT,n} \\ = 0.308 \times I_{VGT,n}$$

壁体への吸熱量 $HG_{1r,n}$ は

$$HG_{1r,n} = 0.7 \times 0.96 \times I_{VGT,n} = 0.672 \times I_{VGT,n}$$

1.2.2. ガラス貫流熱取得

$$HG_{2,n} = A_2 \times K_g \times \theta_{e,n}$$

対流成分は

$$HG_{2c,n} = \alpha_{ic}/\alpha_i \times HG_{2,n} = CL_{2c,n}$$

輻射成分は

$$HG_{2r,n} = \alpha_{ir}/\alpha_i \times HG_{2,n}$$

1.2.3. 内壁貫流熱取得

$$HG_{3,n} = A_3 \times \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} Y_j' \times \theta_{a,n-j} - \sum_{j=0}^{\infty} Z_j' \times \theta_{w,n-j} \right\}$$

1.2.4. 内壁表面における熱平衡式と内表面温度

壁体内表面での熱平衡式は次のようになる。左辺第1項は内表面からの対流成分 ($CL_{4,n}$) を表わし、第2項は内表面からの長波長輻射成分 ($HG_{4r,n}$) を表わす。

$$\alpha_c (\theta_{w,n} - \theta_{r,n}) + \alpha_r (\theta_{w,n} - \theta_{r,n}) \times A_2/A_3 \\ = (HG_{1r,n} + HG_{2r,n})/A_3 + HG_{3,n}$$

これより $\theta_{w,n}$ は

$$\theta_{w,n} = \left\{ (HG_{1r,n} + HG_{2r,n})/A_3 + \sum_{j=0}^{\infty} Y_j' \times \theta_{a,n-j} \right. \\ \left. - \sum_{j=1}^{\infty} Z_j' \times \theta_{w,n-j} + (\alpha_c + \alpha_r \times A_2/A_3) \theta_{r,n} \right\} \\ \div (\alpha_c + \alpha_r \times A_2/A_3 + Z_0')$$

除去熱量 HE_n は

$$HE_n = A_4 [\alpha_c + \alpha_r \times (A_2/A_3) \times \{ \alpha_i / (\alpha_i + \alpha_0) \}] \\ \times (\theta_{w,n} - \theta_{r,n}) + CL_{1s,n} + CL_{2c,n} - QR_n$$

この式を $\theta_{r,n}$ について解くことにより非空調時の室温が算定できる。

1.3. 階差方程式法

1.3.1. 輻射熱が分割第1層に入射すると仮定する方法 (DEX法)

図-2 に示すように日射が室内側表面から微小距離 Δx のところに入射すると仮定する

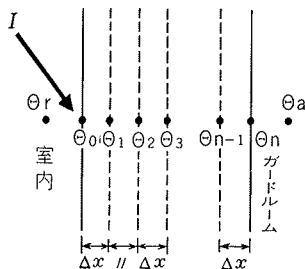


図-2 壁体の分割 (n層分割)

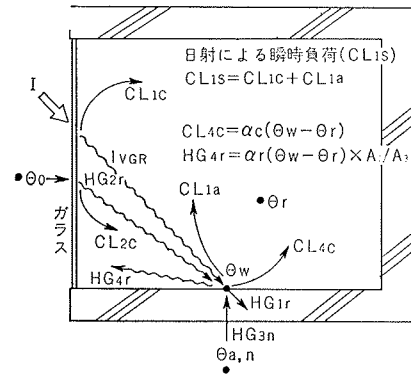


図-1 RF法における壁体内表面での熱収支

と θ_1 における熱平衡式は次のようになる。

$$I - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial t} = C_p \cdot \gamma \cdot \Delta x \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} \Delta x \right)$$

$$\text{結局 } I = C_p \cdot \gamma \cdot \Delta x \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \cdot \Delta x$$

時刻を k として差分化すると

$$k_{+1}\theta_1 = P \left\{ k\theta_0 + k\theta_2 + \left(\frac{1}{P} - 2 \right) \cdot k\theta_1 \right\} + \frac{P}{\lambda} \Delta x \cdot I \dots\dots\dots \text{①}$$

内表面温度は二次式近似により

$$k_{+1}\theta_0 = 2P \left\{ k\theta_1 + m \cdot k\theta_r + \left(\frac{1}{2P} - m + 1 \right) \times k\theta_0 \right\} \dots\dots\dots \text{②}$$

ただし

$$P = a' \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}, \quad a' = \frac{\lambda}{C_p \cdot \gamma}, \quad m = h \cdot \Delta x = \frac{\alpha A}{\lambda} \Delta x$$

隣室側表面も②と全く同様にして

$$k_{+1}\theta_n = 2P \left\{ k\theta_{n-1} + m \cdot k\theta_a + \left(\frac{1}{2P} - m + 1 \right) \times k\theta_n \right\} \dots\dots\dots \text{③}$$

$2 \leq K \leq n-1$ のときは

$$k_{+1}\theta_K = P \left\{ k\theta_{K-1} + k\theta_{K+1} + \left(\frac{1}{P} - 2 \right) \times k\theta_K \right\} \dots\dots\dots \text{④}$$

①式から④式までを連立させて解く。時間間隔と分割数との関係は次の3種類について行なった。

- (1) 0.6分 (分割数10)
- (2) 1.5分 (" 5)
- (3) 3.0分 (" 2)

初期温度分布は計算日の24時間前より (この時の初期温度分布は0でもよいし、定常の計算でもよい。) 開始してと定める。 θ_0 (θ_w) がもとまればあとはRF法と全く同様にして HE_n , $\theta_{r,n}$ をもとめることができる。

1.3.2. 相当輻射気温を用いる方法 (DEX-RAT法)

内表面への輻射熱を相当輻射気温 (θ_{re}) で処理する。

θ_{re} は次のように定義できる。

$$\theta_{re} = \theta_r + \alpha_r / \alpha_A (\theta_b - \theta_r) + \varepsilon_w \cdot I / \alpha_A$$

ε_w ; 内表面輻射率, θ_b ; 対向面表面温度

…… $\theta_b = \theta_r$, $\varepsilon_w = 1$ とすると,

$$\theta_{re} = \theta_r + I / \alpha_A$$

結局, 計算式は次の3式となる。

$$k_{+1}\theta_0 = 2P \left\{ k\theta_1 + m \cdot k\theta_{re} + \left(\frac{1}{2P} - m + 1 \right) \cdot k\theta_0 \right\}$$

$$k_{+1}\theta_n = 2P \left\{ k\theta_{n-1} + m \cdot k\theta_a + \left(\frac{1}{2P} - m + 1 \right) k\theta_n \right\}$$

$1 \leq K \leq n-1$ のとき

$$k_{+1}\theta_K = P \left\{ k\theta_{K-1} + k\theta_{K+1} + \left(\frac{1}{P} - 2 \right) \cdot k\theta_K \right\}$$

1.4. 等価重み係数法 (EWF法)

建物熱的系をマクロ的にとらえてパラメータが学習課程で修正できることを利用して非常に簡単な線形微分方程式を解く方法である。回転実験室においては外乱として日射 (I), 外気温 (θ_o), ガードルーム温度 (θ_a) の3つがあるので次式がなりたつ。

$$Q_o \cdot \frac{d\theta_w}{dt} = K_o (\theta_o - \theta_w) + K_a (\theta_a - \theta_w)$$

$$-K_w (\theta_w - \theta_i) + K_i \cdot I$$

$$HE = K_w (\theta_w - \theta_i)$$

ここに

K_o, K_a, K_w ; 窓, 室周壁外側, 室周壁内側等価熱コンダクタンス (Kcal/hr·°C)

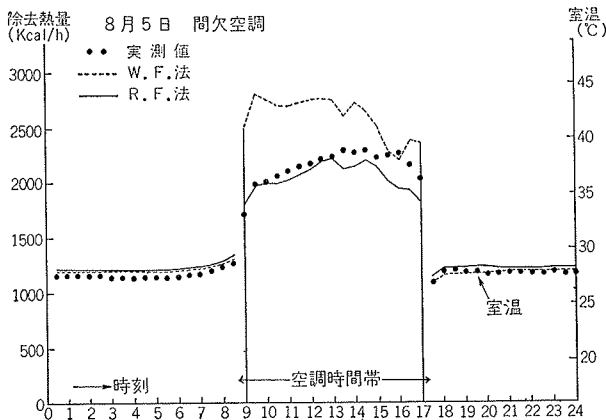
K_i ; 等価日射熱取得係数 (Kcal/hr·°C)

第2式より θ_w を第1式に代入して差分化する。

このとき

$$\frac{K_o}{Q_o} \cdot \Delta t = \alpha, \quad \frac{K_a}{Q_o} \cdot \Delta t = \beta,$$

$$\frac{K_w}{Q_o} \cdot \Delta t = \gamma, \quad \frac{K_i}{Q_o} \cdot \Delta t = \delta$$



図一四 WF法, RF法による計算値と実測値との比較 (間欠運転)

とおくと $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は等価時定数と定義できる。

$$HE_n = \frac{\alpha \cdot K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} (\theta_{o,n} + \theta_{o,n-1})$$

$$+ \frac{\beta \cdot K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} (\theta_{a,n} + \theta_{a,n-1})$$

$$+ \frac{\delta \cdot K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} (I_n + I_{n-1}) - \frac{(2 + \alpha + \beta) \cdot K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} \theta_{i,n}$$

$$+ \frac{(2 - \alpha - \beta) \cdot K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} \theta_{i,n-1} + \frac{2 - \alpha - \beta - \gamma}{2 + \alpha + \beta + \gamma} HE_{n-1}$$

ここで

$$\frac{\alpha \cdot K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} = A, \quad \frac{\beta \cdot K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} = B,$$

$$\frac{\delta \cdot K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} = C$$

$$\frac{(2 + \alpha + \beta) K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} = D, \quad \frac{(2 - \alpha - \beta) K_w}{2 + \alpha + \beta + \gamma} = E,$$

$$\frac{2 - \alpha - \beta - \gamma}{2 + \alpha + \beta + \gamma} = F$$

とおくと, A, B, C, D, E, F は等価重み係数と定義できる。結局上式は次のようになる。

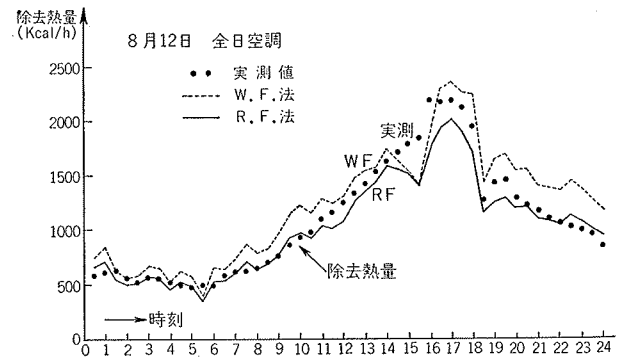
$$HE_n = A (\theta_{o,n} + \theta_{o,n-1}) + B (\theta_{a,n} + \theta_{a,n-1})$$

$$+ C (I_n + I_{n-1}) - D \theta_{i,n} + E \theta_{i,n-1} + F HE_{n-1}$$

ここでパラメータ $A \sim F$ は期間実測値から最小二乗法によって決定する。非空調時の室温をもとめるときには $HE_n = 0$ とする。

2. 各計算法と実測との比較

各計算法と実測との比較を図一4から図一9に示す。等価重み係数法における係数決定は図一3に示すような各組み合わせについて行なったが、間欠運転日では間欠日から、全日運転日では全日日から最も良い。



図一五 WF法, RF法による計算値と実測値との比較 (全日運転)

間欠日の係数を，全日と非空調日から決定する方法はあまり精度が良くない。WF 法と RF 法とを比較すると，全日，間欠日とも RF 法の方が精度が良い。また DEX-RAT法と DEX 法とは，壁体の分割数が多いときには同程度の精度であるが，分割数を少なくしても DEX-RAT法の精度は落ちない。

3. おわりに

本研究を行なうにあたり早大助教授木村建一氏，および同大学，石野久彌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・石野：等価重み係数によるコンピュータ制

- 御のための空調負荷算定，建築学会大会，1972
 2) 石野久彌：コンピュータによる年間空調負荷計算の手法，建築設備と配管工事，1972，5月号

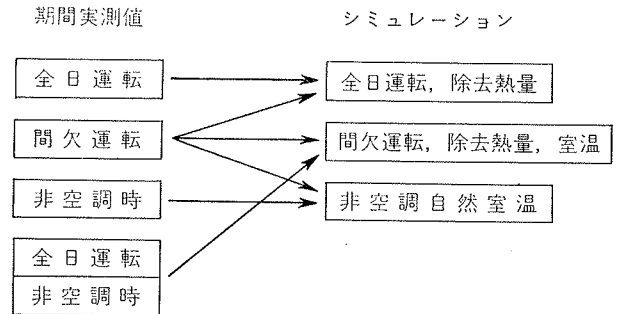


図-3 EWF 法における係数決定の組み合わせ

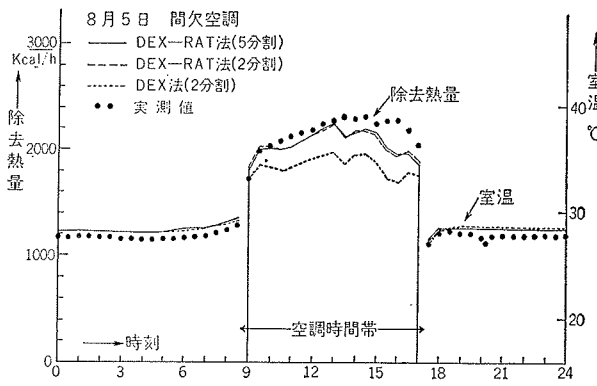


図-6 DEX 法，DEX-RAT 法による計算値と実測値との比較 (間欠運転)

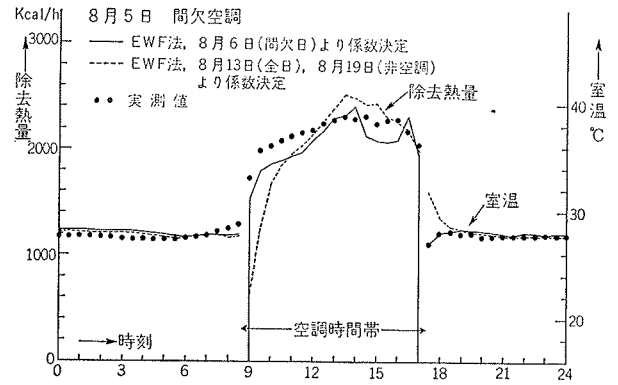


図-7 EWF 法による計算値と実測値との比較 (間欠運転)

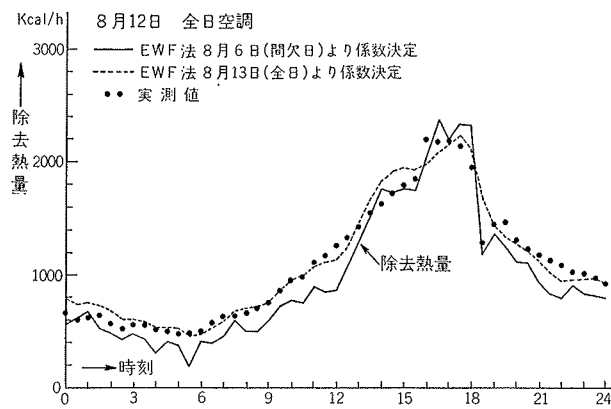


図-8 EWF 法による計算値と実測値との比較 (全日運転)

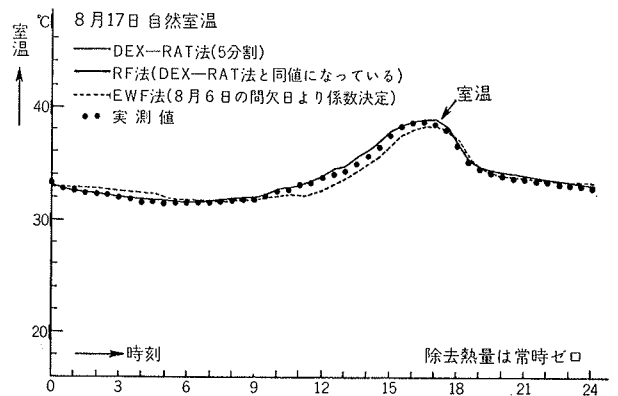


図-9 3種類の計算法と実測値との比較 (非空調，自然室温)