

空調負荷のシミュレーション解析

Dynamic Simulation Analysis for Air-conditioning Heat Load

鳴津和雄* Kazuo Shimazu・片山敏夫** Toshio Katayama

I. まえがき

近年のビルの大形化, ビル内発生熱量の多様性, ビル内熱回収空調方式の普及に伴い, 従来行われていた相当温度差法, ヒートストレージ法等の空調計算方式では, 確度の高い熱的解析計算は計算しずらく, 新しい空調計算方式の出現が望まれていた。

カナダのステーブンスやミタラス等によって提案された新しい熱負荷計算法, レスポンスファクタ法が 1968 年 ASHRAE (米国暖房冷凍空調学会) から暖冷房の年間所要熱量算定法として発表され, 以来各方面で電算機による時系列非定常伝熱算法の一般化が進められ, 日本空調学会において, 動的負荷計算プログラム HASP/ACLD/7101 標準プログラムとして発表された。

レスポンスファクタ法によるダイナミックシミュレーションシステムは, 実際に観測された時々刻々の気象データを使用し, 週日, 週末, 休日, 祝祭日による運転スケジュールの変化, 照明の点滅状態, 人の出入り, 残業などの不規則に生起する事象をすべてあるがままに反映し, 計算を展開して行くことが可能であり, 従来の計算法では明確な解析がやりにくかった事項, たとえば,

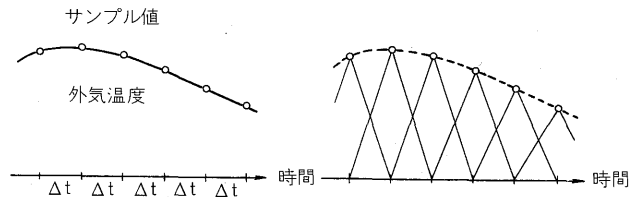
- (1) 複合ビルのように, 空調時間, 発生熱量, 熱発生時間がテナントごとにばらばらで一般のものと異なる場合の解析。
- (2) 熱回収空調方式における建物熱特性と熱負荷変動による熱平衡状態の解析, ならびに補助熱源, 蓄熱槽の規模の算定。
- (3) 年間消費エネルギーの推定。
- (4) 自然温度, 空調前後の室温変動の解析。

等については, その本領をいかんなく発揮する計算手法である。

当社においても, 日本空調学会の動的負荷計算プログラム HASP/ACLD/7101 をベースとして, 空調負荷のダイナミックシミュレーションプログラムを開発したのでその概要を以下に説明する。

II. 基本的な計算手法

この解析システムは, 時々刻々変化する状態をあるがままにとらえ, 任意の条件変化に応じて計算できるダイナミックシミュレーション手法を使用している。



第1図 外気温の変動曲線と三角波列への分解

Fig. 1. Variation curve of temperature and triangle wave time series analysis

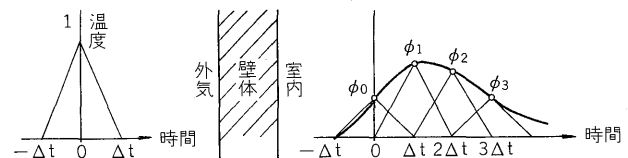
この計算手法として, レスポンスファクタ法がある。

この計算法では, サンプル値の変動を第1図のようにすべて三角波列に分解して考える。このようにすれば, 任意の連続変動は, サンプル時点の値の大きさに応じた高さをもつ三角形を Δt ずつ時間をずらして並べたものに置きかえられ, 長い時間経過を計算する場合にも, 1個の三角波に着目して計算するだけでよいから, その取扱いは簡単になる。

次に, この三角波温度変動による外壁貫流熱を考える。室内と外気が同温度の時には, 熱流は発生しないが外気温度に変動を生じると第2図のように, 一連の三角波列で表される熱流が発生する。その三角波の頂点の高さを,

$$\langle \phi_{T(j)} \rangle; \quad j=0, 1, 2, \dots$$

という数列で表し, これをレスポンスファクタと呼ぶ。すなわち, レスポンスファクタとは単位三角波温度励振による熱流応答係数である。



第2図 レスポンスファクタ

Fig. 2. Response factor

レスポンスファクタを定めた時の励振波の高さは, 1 deg と規定したが, 励振温度が θ deg であった時の応答時系列は,

$$\langle \theta \phi_{T(j)} \rangle; \quad j=0, 1, 2, \dots$$

で表される。

* 建設技術部

** 計測・第一開発部

そして、任意の温度（差）変化

$$\langle \theta_{(i)} \rangle; \quad i=t, t-\Delta t, t-2\Delta t, \dots$$

に対して、時刻 t における貫流熱 $q_{(i)}$ は、

$$q(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \theta(t-j\Delta t) \cdot \phi_T(j)$$

と表される。この式がレスポンスファクタ法による動的負荷計算の基本式であって畳み込みの式（*Convolution*）と呼ばれるものである。

上記に述べたレスポンスファクタは貫流応答と呼ばれているが、一方、吸熱応答と呼ばれるものがある。これら2種の応答の違いは、貫流応答の方は、外気温度励振により、外界から室内に流入する熱流の応答であるのに対して、吸熱応答の方は、室温励振により、室内から壁体に吸われていく熱流の応答である。この吸熱応答による時系列を、

$$\langle \phi_{A(j)} \rangle; \quad j=0, 1, 2, \dots$$

と表す。

また、透過日射量に関しては、壁の表面熱伝達率を α とすれば、

$$\phi_{R(0)} = 1 - \frac{1}{\alpha} \phi_{A(0)}$$

$$\phi_{R(j)} = -\frac{1}{\alpha} \phi_{A(j)}$$

となり、ふく射放熱応答、

$$\langle \phi_{R(j)} \rangle; \quad j=0, 1, 2, \dots$$

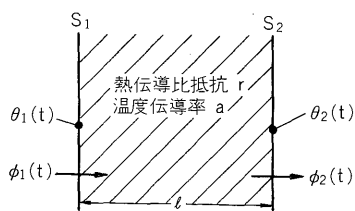
が得られる。これも、一種のレスポンスファクタである。

III. 応答係数の求め方

レスポンスファクタ法で必要な応答係数を求める。多層壁中の1層をとり出し、その熱伝導比抵抗 r 、温度伝導率 a 、厚さ l （熱抵抗 $rl=R$ 、熱容量 C ）とする。

第3図の両表面 S_1, S_2 における温度、熱流を $\theta_{1(t)}, \phi_1(t), \theta_{2(t)}, \phi_2(t)$ 、そのラプラス変換を $\Theta_1(s), \Phi_1(s), \Theta_2(s), \Phi_2(s)$ とすると、

$$\begin{bmatrix} \Theta_1(s) \\ \Phi_1(s) \end{bmatrix} = [X] \cdot \begin{bmatrix} \Theta_2(s) \\ \Phi_2(s) \end{bmatrix}$$



第3図 壁体

Fig. 3. Heat transfer through wall

$$[X] = \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{s/a} l & \frac{r}{\sqrt{s/a}} \sinh \sqrt{s/a} l \\ \frac{\sqrt{s/a}}{r} \sinh \sqrt{s/a} l & \cosh \sqrt{s/a} l \end{bmatrix}$$

で表される。ここで、 $S=-x^2$ として書き直すと、

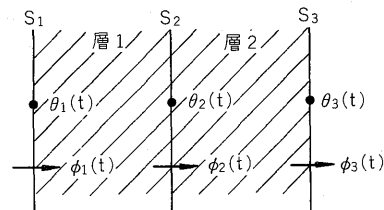
$$[X] = \begin{bmatrix} \cos \sqrt{RC} x & \frac{R}{\sqrt{RC} x} \sin \sqrt{RC} x \\ \frac{\sqrt{RC} x}{R} \sin \sqrt{RC} x & \cos \sqrt{RC} x \end{bmatrix}$$

ただし、表面境界層、中空層など $C=0$ とみなしうる場合には、

$$[X] = \begin{bmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第4図のように、2層が持続した場合には、

$$\begin{bmatrix} \Theta_1(s) \\ \Phi_1(s) \end{bmatrix} = [X_1] \cdot [X_2] \cdot \begin{bmatrix} \Theta_3(s) \\ \Phi_3(s) \end{bmatrix}$$



第4図 2層壁体

Fig. 4. Heat transfer of two layer wall

一般に N 層壁は、表面境界層も含めて $(N+2)$ 層とし、それら各層の特性行列を $[X_k]$ ($k=1, N+2$) とすると壁全体としての特性行列 $[X_T]$ は各層特性行列の積として表され、

$$[X_T] = [X_1] \cdot [X_2] \cdot \dots \cdot [X_{N+2}]$$

いま、上式右辺の行列積の演算を行って、

$$[X_T] = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}$$

となったとすると、両側空気の状態、熱流の関係は、

$$\begin{bmatrix} \Theta_{a1}(s) \\ \Phi_{a1}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_{a2}(s) \\ \Phi_{a2}(s) \end{bmatrix}$$

ただし、 $\Theta = \mathcal{L}(\theta)$ 、 $\Phi = \mathcal{L}(\phi)$ である。

上式において、 $\theta_1(t)=1$ 、 $\theta_2(t)=0$ としたとき、

$$\Theta_{a1}(s) = 1/S, \quad \Theta_{a2}(s) = 0$$

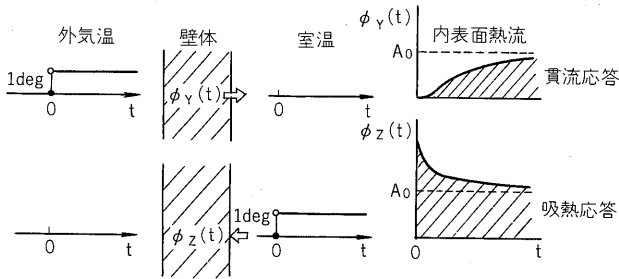
となり、その時には、

$$\Phi_{a2}(s) = \frac{1}{SB(s)}, \quad \Phi_{a1}(s) = \frac{D(s)}{SB(s)}$$

となる。これを逆変換するには留数定理から、 $B(s)=0$ の根として極 $-\alpha_j$ ($j=1, 2, \dots$) を求めれば、

$$\Phi_{a2}(t) = A_0 + \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{S \frac{dB(s)}{ds}} \right\}_{s=\alpha_j} \cdot e^{-\alpha_j t}$$

$$\Phi_{a1}(t) = A_0 + \sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{D(s)}{S \frac{dB(s)}{ds}} \right\}_{s=\alpha_j} \cdot e^{-\alpha_j t}$$



第 5 図 単位応答

Fig. 5. Step response

となり、単位関数の励振に対する単位応答が求まる。

上記により、第 5 図のような単位応答が得られたことになるが、この解析プログラムに必要な三角波温度励振に対する貫流応答 Y_j 、吸熱応答 X_j を求める必要がある。それには、単位応答を積分して、ランプ関数温度励振に対する応答を求め、それを重ね合わせることによって、二等辺三角波に対する応答が求まる。

ここで、単位応答を

$$\phi_y(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{\infty} A_{yi} \cdot e^{-\alpha_i t}$$

$$\phi_z(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{\infty} A_{zi} \cdot e^{-\alpha_i t}$$

とおけば、二等辺三角波による応答 Y_j 、 Z_j ($t = j\Delta t$ と考えて) は、

$j=0$ の時

$$Y_0 = A_0 + \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_{yi}}{\alpha_i} (1 - e^{-\alpha_i \Delta t})$$

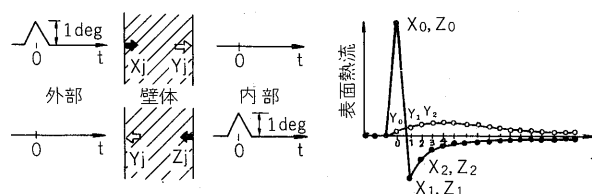
$$Z_0 = A_0 + \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_{zi}}{\alpha_i} (1 - e^{-\alpha_i \Delta t})^2 \cdot e^{-(j-1)\alpha_i \Delta t}$$

$j \geq 1$ の時

$$Y_j = -\frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_{yi}}{\alpha_i} (1 - e^{-\alpha_i \Delta t})^2 \cdot e^{-(j-1)\alpha_i \Delta t}$$

$$Z_j = -\frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_{zi}}{\alpha_i} (1 - e^{-\alpha_i \Delta t})^2 \cdot e^{-(j-1)\alpha_i \Delta t}$$

となる。二等辺三角形の応答係数を第 6 図に示す。



第 6 図 二等辺三角形温度励振に対する表面熱流の応答係数
Fig. 6. Surface heat transfer response factor for triangle wave temperature vibration

IV. 間欠空調時の計算

事務所ビルの一般的な空調方式として間欠空調があり、この空調方式では夜間装置停止後室温が上昇し、室内から壁体内部に向けての熱流が生じて壁体もまた昇温し、壁体内部に熱が蓄積される。翌朝、空調を再開した時点で、室温を下げて、設定温度に回復させるが壁体内に蓄積されていた熱が室内に向けて逆流（放熱）する。したがって、装置側からは、連続空調状態の負荷に加えて、この逆流分だけ多く冷却する必要が生じる。この逆流分の熱を蓄熱負荷と称する。以上の空調停止時の室温変動とそれに伴う空調時の蓄熱負荷を計算するにも、時系列と畳み込み演算を用いる。この場合に用いられる応答時系列は、室全体の吸熱応答を合計して得られ、

$$\phi_j = \sum_R \left\{ S \cdot \phi_{Aj} \right\}$$

$\sum_R$: 室全体についての合計を示す

S : ある部位の表面積

ϕ_{Aj} : その部位の吸熱応答

で示される。

室温が設計値となっているとした時の全流入熱を $q(t)$ 、一方、冷熱供給がないために生じる室温変動を $\theta_R(t)$ とすると、

$$q(t) = \sum_{j=1}^{\infty} \theta_R(t - j\Delta t) \cdot \phi_j$$

が成立する。ただし、今の問題では左辺の流入熱は既知量であるので、式を少し変形すると、

$$\theta_R(t) = \frac{q(t) - \sum_{j=1}^{\infty} \theta_R(t - j\Delta t) \cdot \phi_j}{\phi_0}$$

が得られる。ここで、 $\left\{ -\sum_{j=1}^{\infty} \theta_R(t - j\Delta t) \cdot \phi_j \right\}$ という項は、蓄熱負荷を意味しており、改めて $q_{st}(t)$ と書くと室温変動は、

$$\theta_R(t) = \frac{q(t) + q_{st}(t)}{\phi_0}$$

となる。なお、室温変動は、熱負荷が空調装置の能力を超える場合もあり、その時の室温変動は、装置容量を H とすると、

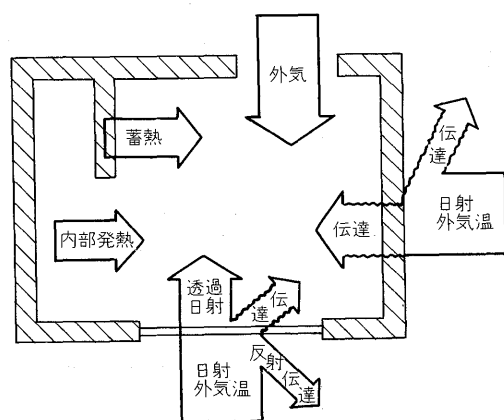
$$\theta_R(t) = \frac{q(t) + q_{st}(t) - H}{\phi_0}$$

で示される。

V. 内容

この計算システムの中で、計算してある空調負荷の要素には、次のものがある（第 7 図参照）。

- 1) ガラス窓透過日射冷房負荷
- 2) ガラス窓貫流熱冷房負荷

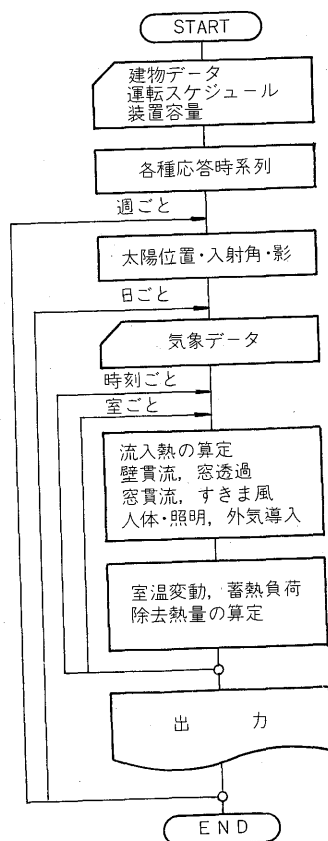


第7図 空調負荷の要素

Fig. 7. Components of cooling load

- 3) 外壁貫流熱冷房負荷
- 4) すきま風による冷房負荷
- 5) 人体発熱負荷
- 6) 照明発熱冷房負荷
- 7) 器具発熱冷房負荷
- 8) 内壁・間仕切り、ドア、床貫流熱冷房負荷
- 9) 外気導入による冷房負荷

このプログラムは、非定常伝熱算法をとり、各要素ごとの負荷を算出し、その有効必要精度を維持しつつ、計算時間の短縮ならびに入力のしやすさを図っている。このプログラムのゼネラルフローチャートを第8図に示す。前処理計算としては、建物熱特性の算出、太陽位置、ル



第8図 ゼネラルフローチャート

Fig. 8. General flow chart

ーバによる影の計算、応答係数を求めてただちに畳み込み演算が可能な毎時間ごとの外乱値を作成する。

除去熱量、室温変位計算に関しては、理想的システムを考えて、室除去熱量、室温変位だけを求めている。

除去熱量は、各種冷房負荷と室温変位による蓄熱負荷の和に等しくなり、これを式で示すと、

$$H_{En} = CL_n + \sum_{j=0}^{\infty} WZ_j \cdot TR_{n-j} + K_n \cdot TR_n$$

H_{En} : n 時の除去熱量

CL_n : n 時の室内合計冷房負荷

TR_n : n 時の室温変位 (基準室温からの変位)

WZ_j : 室温変位に対する除去熱量の重み係数

K_n : 室温変位に対する熱取得係数

となる。

VI. 入力データ

このプログラムで使用されるインプットデータは、次のとおりである (第9図参照)。

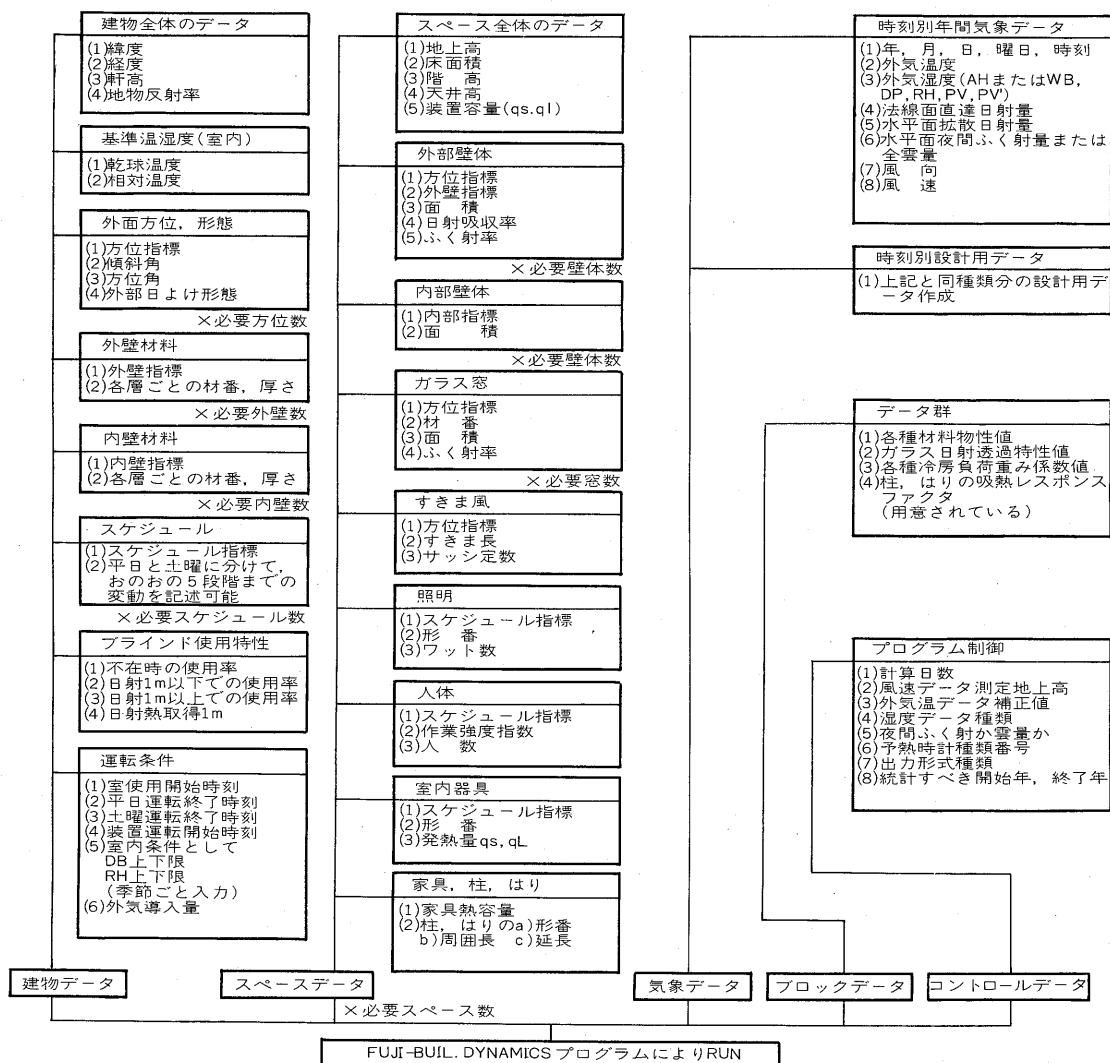
- 1) 建物 (名称, 位置, 方位, 高さ, 構成材料) のデータ
- 2) スペース (名称, 壁体, ガラス窓, 照明, 人体, すきま風) のデータ
- 3) 窓, 壁の断面構成のデータ
- 4) 気象 (外気湿温度, 風向, 風速, 日射量, 雲量) データ
- 5) 室内発生熱 (器具, 人体, 照明) のデータ
- 6) 室内条件 (基準温湿度) のデータ
- 7) 室使用スケジュールのデータ
- 8) 装置運転スケジュールのデータ
- 9) 出力制御のデータ

VII. 出力結果

昭和51年2月16日から3月3日まで、目黒区東山ビルにおいて、実際に空調装置の実測を行った。この実測では5階をペリメータ南西部 (PSW)、ペリメータ北東部 (PNE) とインテリア部 (INT) の三つのスペースに分けて解析した (第10図)。

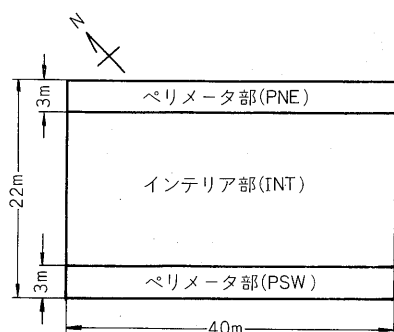
一方、この期間の気象データとして気象庁のデータを使用して、レスポンスファクタ法により、電算機にて、上記ビルのダイナミックシミュレーションを行い、その結果を解析した。そのうち2月16日から2月20日までの実測結果とこの計算システムで計算した計算結果を第11図に示す。

これら二つの結果に対して、レスポンスファクタ法による計算結果と、実測結果とを比べてみると計算結果の方がやや小さめに出ているが、その差は数%以内であり実用上は支障のない差と思われる。



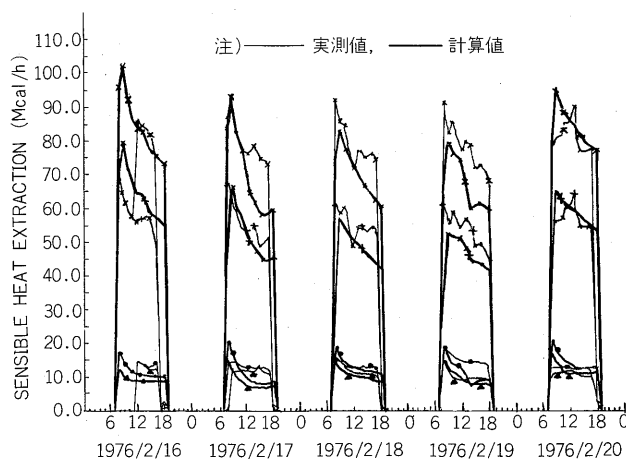
第 9 図 計算に必要な入力データ

Fig. 9. Input data required for calculation



第10図 5階モデル

Fig. 10. Model of 5th floor



第11図 実測値と計算値の結果

Fig. 11. Results of measurement data and simulation data

実測値との比較は暖房期のデータだけであるが、冷房期データについても現在、実測結果を取りまとめ中であるので、別途誌面を改めて発表する予定である。

VIII. あとがき

以上、空調負荷のシミュレーション解析について、そ

の概要を説明した。

開発したプログラムによる計算結果と実測結果は、比較的よく一致し、実用に十分耐えられるものと思われるが、まだ、不十分な点もあり、今後さらに検討を続けるつもりである。



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。