

熱橋の熱応答近似

5.1 はじめに

近年、定常計算に基づいた簡易熱負荷計算法では熱橋を扱うようになってきたが[51]、それより高度で精密とされる動的負荷計算プログラムでは熱橋への対応がほとんどなされていないのが現状である。本章の研究は、HASP など応答係数法をベースとした動的熱負荷計算プログラムで、熱橋を含む壁体の計算を簡易に行うことを目的としたものである。熱橋の非定常特性に関しては、赤坂ら [2]、Burch ら [13] などの研究があり、特に Burch らは熱橋の応答係数の計算を行っている。これは差分法により時間領域でランプ関数の励振を与えた時の熱流を計算し、それを 3 角波励振の応答係数に変換するものである。しかし、正の Laplace パラメータに対する伝達関数を求めておけば、数値 Laplace 逆変換することにより容易に応答係数を計算することができることは第 2 章で示したとおりである。そこで、本章では、伝達関数を直接近似する手法について検討を行い、熱流が 1 次元的であると仮定して解析的に計算した各部の熱応答を面積加重平均して求めた平均熱応答を、既にデータベース化されている定常応答の補正係数を利用して修正する非常に簡易な方法で十分な精度で熱応答が近似できることを示す。

5.2 計算方法

5.2.1 精算熱応答の計算方法

伝達関数を数値的に計算する方法としては、差分法や有限要素法のような領域型解法によってもよいし、第 3 章で地盤に接する壁体の伝達関数を求めたのと同様に境界要素法に

よってもよい。本章では、差分法によって伝達関数を求めることにする。なお、定常問題すなわち熱貫流率の、有限要素法や境界要素法、また、各種簡易計算法による計算結果の比較が赤坂ら [2] によって行われている。

第2章で説明したように、差分法によって空間領域を離散化した場合、Robin 境界条件、すなわち、周囲流体温度を境界温度にとれば、

$$C_{\Omega} \dot{T}_{\Omega}(t) = K_{\Omega} T_{\Omega}(t) + K_{\Omega\Gamma} T_{\Gamma}(t) \quad (5.1)$$

$$q_{\Gamma}(t) = K_{\Omega\Gamma}^T T_{\Omega}(t) + K_{\Gamma} T_{\Gamma}(t) \quad (5.2)$$

となる。ただし、 $T_{\Omega}(t)$ は領域内部の温度ベクトル、 $T_{\Gamma}(t)$ は周囲流体温度ベクトル、 C_{Ω} は熱容量行列、 K_{Ω} は熱伝導行列、 $K_{\Omega\Gamma}$ は熱伝達行列で、

$$K_{\Gamma} = K_{\Omega\Gamma}^T K_{\Omega}^{-1} K_{\Omega\Gamma} \quad (5.3)$$

である。 T_{Γ} 、 q_{Γ} の次元は 2 で、外気側、室内側に対応している。式 (5.1)、式 (5.2) から伝達関数行列を求めれば、 s を Laplace パラメータとして、

$$Y(s) = K_{\Omega\Gamma}^T (sC_{\Omega} - K_{\Omega})^{-1} K_{\Omega\Gamma} \quad (5.4)$$

となり、この $Y(s)$ を用いれば、

$$q_{\Gamma}(s) = Y(s) T_{\Gamma}(s) \quad (5.5)$$

と表現できる。今、

$$T_{\Gamma} = \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix}, \quad q_{\Gamma} = \begin{bmatrix} q_i \\ q_o \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

とする。ただし、 T_i 、 q_i は室内側温度・熱流、 T_o 、 q_o は外気側温度・熱流である。そのとき、

$$Y(s) = \begin{bmatrix} Y_{11}(s) & Y_{12}(s) \\ Y_{21}(s) & Y_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

で、

$$G_T(s) = Y_{12}(s) \quad (5.8)$$

$$G_A(s) = -Y_{11}(s) \quad (5.9)$$

とおくと、 $G_T(s)$ が熱貫流応答、 $G_A(s)$ が吸熱応答と通常建築伝熱でいわれるものになる。第2章で述べた正の Laplace パラメータ s を離散的に与えて、 $G_T(s)$ 、 $G_A(s)$ を数値計算によって求め、それを有理多項式近似することによって、応答計算に必要な係数を算出することができる。

Laplace パラメータ s としては、 $0, 10^{-4}, 10^{-3.5}, \dots, 10^2$ を考え、この 14 個の Laplace パラメータについて熱貫流応答 $G_T(s)$ と吸熱応答 $G_A(s)$ を 2 次元の差分法によって、それぞれ計算し、精算熱応答とする。壁境界上に熱容量をもつ節点を設けないと s の値が大き

いときに吸熱応答の誤差が大きくなる (表面熱伝達率に収束しない) ため、空間離散化はコントロールボリューム法のような cell-centered method ではなく、有限要素法と同じ、vertex-centered method によっている。もしも、コントロールボリューム法による場合は半コントロールボリュームを壁境界に配さなければならないことを注意しておく。

比較検討用に用いる周波数領域における精算熱応答は、 $s = i\omega$ ($i = \sqrt{-1}$, ω : 角振動数) と置き換えて計算するだけである。ただし、係数が複素数になるため、計算量はかなり増大する。

なお、計算プログラムは、 $s = 0$ の定常問題で、ISO/DIS (Draft International Standard) 10211 "Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - General calculation methods" [40] Annex A.1 TEST REFERENCE CASES の 2 次元プログラム用テスト CASE 1, CASE 2 により、妥当性の検証を行っており、十分な精度をもつことを確認している。

5.2.2 近似熱応答の計算方法

平均熱貫流率と同一の概念で平均熱貫流応答 $\bar{G}_T(s)$ と平均吸熱応答 $\bar{G}_A(s)$ を考える。これらは熱流が 1 次元的であると仮定して解析的に計算した各部の熱応答を面積加重平均したものである。次に、吸熱応答が、 $s \rightarrow \infty$ で室内側熱伝達率 α_i に収束することに留意して、以下の式により近似熱応答を計算する。

$$\hat{G}_T(s) = \beta \bar{G}_T(s) \quad (5.10)$$

$$\hat{G}_A(s) = (1 - \gamma) \alpha_i + \gamma \bar{G}_A(s) \quad (5.11)$$

ただし、

$$\beta = \frac{K}{\bar{K}}$$

$$\gamma = \frac{\bar{\alpha}_i - \beta}{\bar{\alpha}_i - 1}$$

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\alpha_i}{\bar{K}}$$

であり、 K 、 \bar{K} は、それぞれ熱貫流率及び平均熱貫流率である。 β 、 γ は、定常特性のみで決まる係数である。 β は、「住宅の新省エネルギー基準と指針」[51] で基準熱橋係数と呼ばれているもので、住宅の主だった金属熱橋に関してデータベース化されておりそのまま用いることができる¹。 γ は室内側表面熱伝達率と平均熱貫流率及び β から計算できるので本手法を採用するにあたって新たにデータベース化しなくてはならない係数はない。近似熱応答 $\hat{G}_T(s)$ 、 $\hat{G}_A(s)$ は $s = 0$ 、 $s = \infty$ で精算熱応答 $G_T(s)$ 、 $G_A(s)$ に一致する。

熱貫流応答の応答係数は、式 (5.10) から明らかのように、単純に平均熱貫流応答の応答係数を β 倍するだけである。吸熱応答の応答係数は、2 等辺 3 角波励振に対する平均吸熱応

¹同基準と指針によれば、木熱橋については平均熱貫流率による計算で十分でそれ以上の補正は不要としている。

答のバルス伝達関数を,

$$\bar{G}_A(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \bar{C}_k z^{-k} \quad (5.12)$$

とすれば, 式(5.11)より,

$$\bar{C}_0 = (1 - \gamma)\alpha_i + \gamma\bar{C}_0 \quad (5.13)$$

$$\bar{C}_k = \gamma\bar{C}_k, \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (5.14)$$

となる.

式(5.10), 式(5.11)により計算された正の Laplace 変換領域における近似熱応答を精算熱応答と比較するとともに, $s = i\omega (i = \sqrt{-1}, \omega: \text{角振動数})$ と置き換えて計算した精算熱応答と, 式(5.10), 式(5.11)を固定公比法 ([76], [108]) により数値ラプラス逆変換して求めた近似熱応答を比較し, 周波数領域においても精度の検討を行う. 周波数領域における近似熱応答には数値 Laplace 逆変換の誤差も加わっていることになる.

5.2.3 計算モデル

赤坂ら [2] が検討した 12 モデルから特に 2 次元的な熱流の影響が大きいとみられる 3 モデルを採りあげて検討の対象とした (表 5.1). 計算は 2 次元の差分法によって行い², メッシュ分割は, Type 1, 2, 3 でそれぞれ, $31 \times 42, 31 \times 20, 40 \times 42$ で³, 各モデルとも熱橋部分は特に細かくメッシュ分割を行った.

5.3 計算結果

まず, 内断熱で金属熱橋がある Type 1 の計算結果をみる. 図 5.1 において近似熱応答は精算熱応答とはほぼ完全に一致しており, 図上からは違いを識別できない. 図 5.2 は周波数応答を伝達ベクトルの形でプロットしたもののだが, 数値 Laplace 逆変換の誤差が入っても近似熱応答は精算熱応答を十分よく近似していると言える. 次に, 中央断熱でコンクリート熱橋がある Type 2 の計算結果を図 5.3, 5.4 に示す. Type 1 とは大分熱容量が異なる壁体であるが, 近似熱応答の精度は Type 1 と同程度で非常によい. 最後に, 外断熱で金属熱橋がある Type 3 の計算結果を示すが, Type 1, Type 2 の結果に比べれば, 近似熱応答の精度は悪い. 図 5.5 では, 特に近似吸熱応答において精算熱応答からの誤差が目立っている. 図 5.6 の周波数領域で見ると振幅の違いもさることながら, かなりの位相差が生じていることがわかる. しかし, 実用的には許容できる範囲にあり, 特に精度が要求されるような場合以外は近似熱応答を用いても問題ないであろう.

²プログラムは 3 次元用であるが, 3 次元方向の両面を完全断熱として, 2 次元的な境界条件を与えて計算している.

³3 次元方向は 1.

表 5.1 熱橋モデル

熱橋タイプ	断面 [mm]	番号	材料	材厚 [mm]
Type 1		1	石膏ボード	10
		2	断熱材	60
		3	鋼材	60
		4	軽量コンクリート	50
Type 2		1	普通コンクリート	100
		2	普通コンクリート	80
		3	断熱材	80
		4	普通コンクリート	70
Type 3		1	石膏ボード	10
		2	普通コンクリート	120
		3	鋼材	60
		4	断熱材	60
		5	モルタル	20

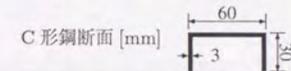


表 5.2 物性値

材料	容積比熱 [Wh/m ³ K]	熱伝導率 [W/mK]
石膏ボード	314	0.14
断熱材	11	0.037
普通コンクリート	538	1.1
軽量コンクリート	183	0.15
モルタル	444	1.3
鋼材	1048	45
室内側表面熱伝達抵抗	0.13[m ² K/W]	
外気側表面熱伝達抵抗	0.04[m ² K/W]	

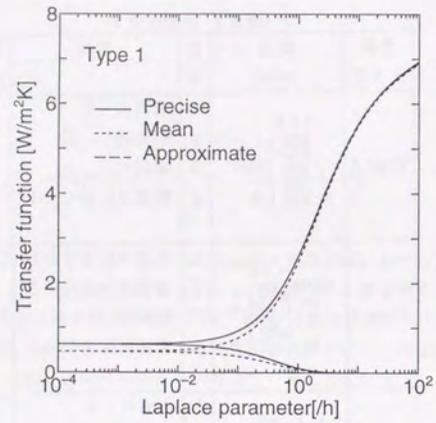


図 5.1 Type 1 の伝達関数

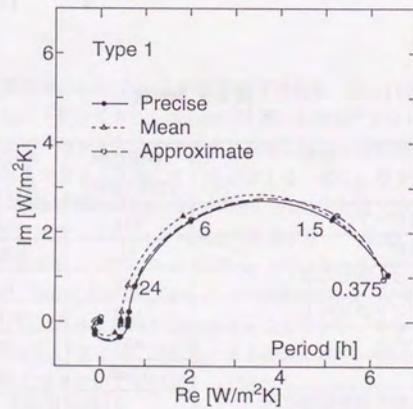


図 5.2 Type 1 の伝達ベクトル

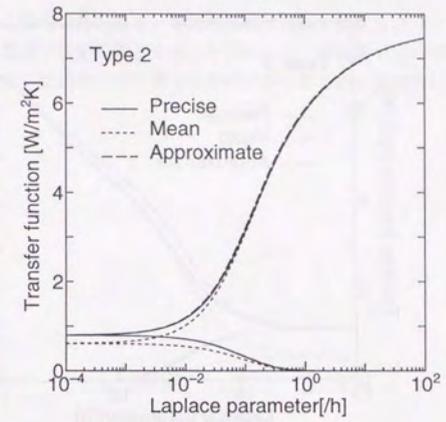


図 5.3 Type 2 の伝達関数

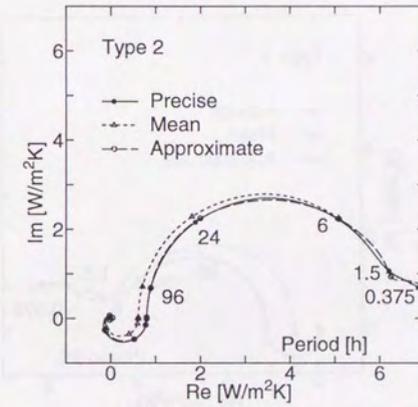


図 5.4 Type 2 の伝達ベクトル

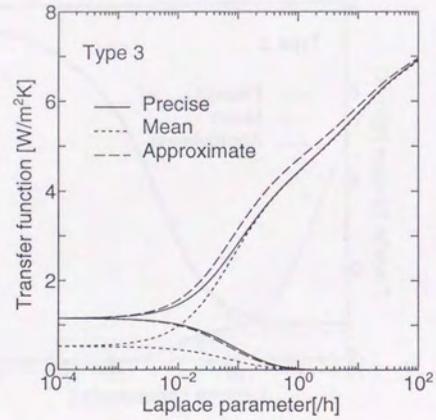


図 5.5 Type 3 の伝達関数

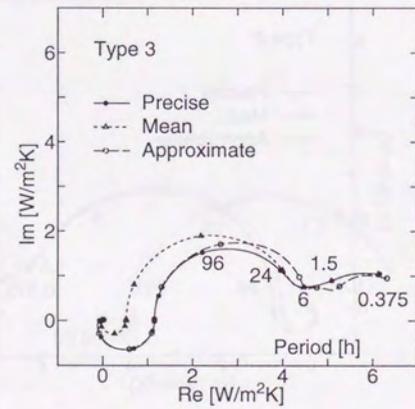


図 5.6 Type 3 の伝達ベクトル

5.4 まとめ

壁体に熱橋がある場合の熱応答を、平均熱応答に係数を乗じるだけといった非常に簡易な扱いで、十分な精度で推定できる見通しが得られた。外断熱で室内側に大きな熱容量がある場合に関しては、位相差が生じ多少誤差が大きくなるが、実用的には問題無い程度である。

熱水分同時移動を考慮した多層壁体の応答

6.1 はじめに

負荷計算に関わる湿気の非定常現象としては、間欠空調時の蓄熱負荷や運転停止時の湿度変動といった1日以内で捉えれば済むような比較的短周期の現象と季節的な蓄湿や竣工時のコンクリートからの放湿といった長周期の現象がある。現在は主に前者を対象として研究が行われており、この場合は室内側表面付近のみに着目していても湿気の拡散速度は非常に遅いため問題が小さい、日周期程度の変動は表面からほんの数mm程度考えればある程度説明はつく。このため、表面部分のみに湿気容量を集中化することもしばしば行われる。逆にいえば差分などで壁体を離散化する場合には表面付近を相当細かく分割しないと結果がおかしくなる。一方、後者の長周期の現象も湿気の拡散速度が非常に遅いことに由来して生じる。熱の場合でいえば季節的な蓄熱等は通常の壁体ではまず考える必要はなく問題となるのは地中壁のような非常に厚い壁体のみである。しかるに、湿気の場合は通常の壁体でも非定常現象として本来捉えなければならない性格を有している。潜熱負荷計算法を構築するにあたっては、前者の把握を主にしつつも、後者の問題についてもある程度の対応ができるように配慮すべきであろう。

本章では、第2章で述べた正のLaplace変換領域における解を離散的に求め、それらに局所的な適合条件を課して有理多項式近似し、時間領域の解を求める手法(固定公比法)を線形熱水分同時移動方程式に適用することを試みる。線形系とみるのが妥当であるか否かといった問題はあるものの長周期の応答に対しても対応している。

簡単に壁体内の熱・水分移動に関する既往の研究を振り返ってみよう。壁体内の熱・水分の移動に関する研究は松本 [65] によるものをはじめとして既に多くの研究蓄積がある。

現象のモデル化に関していえば、地盤内の水分移動を扱った研究で古くから盛んに行われており [19]、現在ではかなり複雑な解析も行われている。建築壁体に限っても、方程式自体、扱うレベルによって種々のものがある。結露解析が目的であれば少なくとも液水移動までは考える必要があるが、負荷計算レベルであれば、蒸気拡散支配を仮定し、絶対湿度をポテンシャルとしたものに限定してもよいだろう。以下に紹介する研究もすべてこれに基づいている。松本は、蒸気拡散支配での基礎方程式を示し、以降の研究の出発点となった。それ以前のモデルに関しては文献 [65] に詳細なレビューがあるので参考されたい。この方程式に基づき、建築特有の境界条件すなわち、両側表面の第3種境界境界条件のもとでの単層壁の解を Laplace 変換を用いて導き、解の性状を検討している。また、周波数領域での解も求めている。

多層壁の応答を解く問題は Laplace 変換面上での解は松本によって示されていたものの、時間領域への移行すなわち逆変換のアルゴリズムまでは行われていなかった。松尾は、単独の場合と同様の手法を用いて固有方程式の根を求めるアルゴリズムを開発し (精解法)、熱水分同時移動を考えると単独の場合と比べ、湿気の拡散速度が極めて遅いため、十分な精度を確保するのに必要項数が非常に多く必要になることを示した [84]。例えば極の値が 3 以下になるのに普通コンクリート 100mm でも 100 項程度必要になる。また、極が必ず負の実数になるという保証がないため [71]、松尾のアルゴリズム (Newton-Raphson 法による根探索) ではうまくいかない場合があり、極を求めるのは存外やっかいであることもわかった。これに対して、吉田は、離散フーリエ変換を用いて 3 角波応答を求める手法を開発し、これによって計算上の困難が回避できるのみでなく計算時間も短縮できることを示した [160]。しかし、この手法は応答が指数級数として表現されているわけではないので、畳み込み演算に項別公比法などの効率的な手法を適用することができないといった難点がある。

一方、中尾は、壁体を分割して連立常微分方程式を導き、そこから数値積分によって応答係数を求めた [94]。これらとは別に差分法によって多層壁の熱水分移動を計算する方法も多く行われている。中尾は、差分解についても検討しており、最適差分条件の算出 [103]、差分解の誤差 [104]、簡易計算法 [105] についての研究がある。また、境界要素法による解析も芝池 [126] によって行われている。これらの領域分割を伴う手法は分割方法によって解の精度が大きく変わってくるという問題がある。

6.2 線形熱水分同時移動方程式

熱水分同時移動方程式には、液層水分の移動を考えるか、水分ポテンシャルとして何をを用いるか (絶対湿度・含水率・水分の化学ポテンシャル等)、また物性値の温湿度依存をどこまで考えるか等によって種々のバリエーションがある。

ここでは、蒸気拡散支配 (ハイグロスコピックの状態ともいう、液相水分の移動が小さい状態) を仮定し、水分ポテンシャルとして絶対湿度を用いた場合について述べることにする。

線形熱水分同時移動方程式は、松本によってはじめて導かれたものであるが、ここでは、それを簡易な形で導いてみよう。

熱伝導における Fourier の法則は、

$$q_T = -\lambda \nabla T \quad (6.1)$$

で示される。ただし、 T は温度、 λ は熱伝導率、 q_T は熱流束である。蒸気拡散支配を仮定すれば、Fourier の法則と同じように水分流束が絶対湿度勾配に比例するとみなせる。すなわち、

$$q_X = -\lambda' \nabla X \quad (6.2)$$

である。ただし、 X は絶対湿度、 λ' は水分伝導率、 q_T は水分流束である。これを Fick の法則という。

さて、一様な領域 Ω 、及びその境界 Γ を考え、 Ω における時刻 t での熱量の保存を考える。単位時間内に Γ を通って Ω に流入する熱量 $(-\int_{\Gamma} q_T n d\Gamma)$ (n は境界上での外向き単位法線ベクトル) の他に相変化による吸着熱を考えなければいけない点が単独の場合と異なる部分である。すなわち、単位体積当たりの水分量を φ' としたとき、単位時間当たりの Ω 内の水分量の増加分 $(\int_{\Omega} \partial \varphi' / \partial t d\Omega)$ は水蒸気 (気相) の形で移動してきて Ω 内で吸着されたものによると考えられるから¹、相変化による吸着熱が発生する。多孔質の材料では空隙内に気相水分も存在するが気相水分量は液相水分量に比べて非常に少ないため無視する。これらの和が Ω での熱量の増加分であるから、熱量の保存式は次のようになる。

$$\int_{\Omega} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\int_{\Gamma} q_T n d\Gamma + \int_{\Omega} r \frac{\partial \varphi'}{\partial t} d\Omega \quad (6.3)$$

ただし、 $c\rho$ は容積比熱、 r は水の蒸発潜熱である。

また、 Ω 内の水分量の保存式は次式となる。

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \varphi'}{\partial t} = -\int_{\Gamma} q_X n d\Gamma \quad (6.4)$$

境界積分の項を Gauss の定理によって体積積分に直し、式 (6.1)、(6.2) を代入すれば、

$$\int_{\Gamma} q_T n d\Gamma = \int_{\Omega} \nabla q_T d\Omega = -\int_{\Omega} \lambda \nabla^2 T d\Omega \quad (6.5)$$

$$\int_{\Gamma} q_X n d\Gamma = \int_{\Omega} \nabla q_X d\Omega = -\int_{\Omega} \lambda' \nabla^2 X d\Omega \quad (6.6)$$

となるので、式 (6.3)、(6.4) は、

$$\int_{\Omega} \left(c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - r \frac{\partial \varphi'}{\partial t} - \lambda \nabla^2 T \right) d\Omega = 0 \quad (6.7)$$

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \varphi'}{\partial t} - \lambda' \nabla^2 X \right) d\Omega = 0 \quad (6.8)$$

¹ 蒸気拡散支配を仮定していることに注意。

となる。更に、 Ω のとりかたは任意だから、

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - r \frac{\partial \varphi'}{\partial t} - \lambda \nabla^2 T = 0 \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial \varphi'}{\partial t} - \lambda' \nabla^2 X = 0 \quad (6.10)$$

とかくことができる。ここで、

$$\frac{\partial \varphi'}{\partial t} = \frac{\partial \varphi'}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial \varphi'}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.11)$$

であるから、

$$\kappa = \frac{\partial \varphi'}{\partial X} \quad (6.12)$$

$$\nu = -\frac{\partial \varphi'}{\partial T} \quad (6.13)$$

とおけば、

$$(c\rho + r\nu) \frac{\partial T}{\partial t} - r\kappa \frac{\partial X}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (6.14)$$

$$\kappa \frac{\partial X}{\partial t} - \nu \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda' \nabla^2 X \quad (6.15)$$

とかける。温度 T および絶対湿度 X の変化の範囲があまり大きくなければ、 κ , ν は一定とおけて、式 (6.14), (6.15) は線形方程式として扱うことができる。

6.3 単層のアドミッタンス行列

上で導いたように、ハイグロスコピック (蒸気拡散支配) でかつ、温度、絶対湿度の変動があまり大きくない場合、熱および水分の拡散方程式は線形方程式として扱える。1次元の場合、式 (6.14), (6.15) で $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2$ であるから、

$$(c\rho + r\nu) \frac{\partial T}{\partial t} - r\kappa \frac{\partial X}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6.16)$$

$$\kappa \frac{\partial X}{\partial t} - \nu \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (6.17)$$

もしくは行列表示して、

$$C \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} \quad (6.18)$$

ただし、

$$C = \begin{bmatrix} c\rho + r\nu & -r\kappa \\ -\nu & \kappa \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

$$K = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda' \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} T \\ X \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

となる。この式を1次元の線形熱水分同時移動方程式という。

上式の両辺に左から C^{-1} をかければ、

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{A} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} \quad (6.22)$$

ただし、 \mathbf{A} は拡散係数行列で、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{TT} & a_{TX} \\ a_{XT} & a_{XX} \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

$$= C^{-1} K \quad (6.24)$$

$$= \frac{1}{c\rho\kappa} \begin{bmatrix} \kappa\lambda & r\kappa\lambda' \\ \nu\lambda & (c\rho + r\nu)\lambda' \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

と表現することもできる。

次に拡散係数行列 \mathbf{A} を相似変換 \mathbf{P} によって対角化する。すなわち、 $\tilde{\mathbf{A}}$ を標準形として、

$$\mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P} = \tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} a_p & 0 \\ 0 & a_m \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

ここに、 a_p , a_m は \mathbf{A} の固有値で、

$$\left. \begin{matrix} a_p \\ a_m \end{matrix} \right\} = \frac{a_{TT} + a_{XX} \pm \sqrt{(a_{TT} - a_{XX})^2 + 4a_{TX}a_{XT}}}{2} \quad (6.27)$$

となる。 \mathbf{P} は、 a_p , a_m に対応する固有ベクトルを並べて、例えば、

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} a_{XX} - a_p & -a_{TX} \\ -a_{XT} & a_{TT} - a_m \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

とすればよい。式 (6.22) の左から \mathbf{P}^{-1} を乗ずれば、

$$\frac{\partial \mathbf{P}^{-1} \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} \quad (6.29)$$

となる。ここで、

$$\mathbf{u} = \mathbf{P} \tilde{\mathbf{u}} \quad (6.30)$$

となる $\tilde{\mathbf{u}}$ を考えれば、 $\mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P} = \tilde{\mathbf{A}}$ と置き換えて、

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} = \tilde{\mathbf{A}} \frac{\partial^2 \tilde{\mathbf{u}}}{\partial x^2} \quad (6.31)$$

とかける。ただし、

$$\tilde{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_p \\ \tilde{u}_m \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

であり、 $\tilde{\mathbf{u}}$ はモード領域の解である。式 (6.31) は、 \tilde{u}_p , \tilde{u}_m に関する互いに独立な単純熱伝導方程式であり、容易に解くことができる。初期条件を 0 とすれば、式 (6.31) の Laplace 変換は、 s を Laplace パラメータとして、

$$s \tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{A}} \frac{\partial^2 \tilde{\mathbf{u}}}{\partial x^2} \quad (6.33)$$

となる。ただし、 \bar{u} は Laplace 変換されたものだが時間領域と同じ記号を用いる。 $x=0$ において \dot{u} , $x=l$ において \dot{u}' とし、それぞれの面における外向き法線微分を、

$$\dot{q} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} \quad (6.34)$$

$$\dot{q}' = \frac{\partial \bar{u}'}{\partial n'} \quad (6.35)$$

と定義する。すると、

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{q}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_A & \dot{Y}_B \\ \dot{Y}_B & \dot{Y}_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{u}' \end{bmatrix} \quad (6.36)$$

という関係式を導くことができる。ここに、

$$\dot{Y}_A = \begin{bmatrix} \beta_p \coth \beta_p l & 0 \\ 0 & \beta_m \coth \beta_m l \end{bmatrix} \quad (6.37)$$

$$\dot{Y}_B = \begin{bmatrix} \beta_p \operatorname{cosech} \beta_p l & 0 \\ 0 & \beta_m \operatorname{cosech} \beta_m l \end{bmatrix} \quad (6.38)$$

ただし、 $\beta_p = \sqrt{s/a_p}$, $\beta_m = \sqrt{s/a_m}$ で、 $\coth x = (e^x + e^{-x})/(e^x - e^{-x})$, $\operatorname{cosech} x = 2/(e^x - e^{-x})$ である。ところで、

$$u = P\bar{u} \quad (6.39)$$

$$q = -K \frac{\partial u}{\partial n} = -KP\dot{q} \quad (6.40)$$

などより、物理座標では、

$$\begin{bmatrix} q \\ q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_B & Y_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ u' \end{bmatrix} \quad (6.41)$$

の関係がある。ここに、

$$\dot{Y}_A = -KP\dot{Y}_A P^{-1} \quad (6.42)$$

$$\dot{Y}_B = -KP\dot{Y}_B P^{-1} \quad (6.43)$$

である。式(6.41)の、

$$Y = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_B & Y_A \end{bmatrix} \quad (6.44)$$

を、単層のアドミッタンス行列という。なお、式(6.41)を変形して、

$$\begin{bmatrix} u \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_A & W_B \\ W_C & W_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ q' \end{bmatrix} \quad (6.45)$$

のように表現したものを遷移行列(8端子行列)という。この形を用いる場合は、 q と q' で向きを同じに定義するほうがよい。

6.4 多層壁のアドミッタンス行列

多層壁のアドミッタンス行列を求めるには遷移行列(8端子行列)を掛け合わせていき、最後に遷移行列をアドミッタンス行列に変換する手法がまず考えられる。これは、熱単層の場合に用いられている手法であるが、熱水分同時移動方程式の周波数応答を求める際、各層の遷移行列を数値的に求め、行列の積を計算しようとする、激しい桁落ちが生じ4倍精度の演算によっても意味のある結果が得られないことがわかっている[66]。陽な解析表現を用いればこのような問題は生じない[67]ものの計算は煩雑なものになる。もう1つの方法は各層のアドミッタンス行列を求めておき、それを順次合成していく方法である。この手法が周波数応答を求める際、有効であることが指摘されている[68][69][160]。

さて、Laplace 逆変換に固定公比法を用いる場合、Laplace パラメータが正の実数の場合の伝達関数を求める必要があるが、この場合にも周波数応答の場合と同じ状況に陥る。このため、単層のアドミッタンス行列を合成していく手法の適用をはかったところ満足のいく結果が得られた。Laplace パラメータが負の実数のときにはこのような問題は生じない。そのため精解法においては各層の遷移行列の積から全体の遷移行列を得ることができる。精解法では微分値を計算する必要上遷移行列による表現を用いたほうが都合がよい。ここでは、アドミッタンス行列の合成法について簡単に述べることにする。 n 層のアドミッタンス行列を式(6.44)から、

$$Y_n = \begin{bmatrix} Y_{An} & Y_{Bn} \\ Y_{Bn} & Y_{An} \end{bmatrix} \quad (6.46)$$

とすれば、 n 層の各面の温度を u_n , u'_n , また、熱流を q_n , q'_n として、

$$\begin{bmatrix} q_n \\ q'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{An} & Y_{Bn} \\ Y_{Bn} & Y_{An} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_n \\ u'_n \end{bmatrix} \quad (6.47)$$

と n 層の方程式が得られる。また、1層から $n-1$ 層まで合成されたアドミッタンス行列を、

$${}_{n-1}Y = \begin{bmatrix} {}_{n-1}Y_A & {}_{n-1}Y_B \\ {}_{n-1}Y_B & {}_{n-1}Y_A \end{bmatrix} \quad (6.48)$$

とすれば、

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q'_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_{n-1}Y_A & {}_{n-1}Y_B \\ {}_{n-1}Y_B & {}_{n-1}Y_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u'_{n-1} \end{bmatrix} \quad (6.49)$$

である。適合条件、

$$u_n = u'_{n-1} \quad (6.50)$$

及び連続条件、

$$q_n + q'_{n-1} = 0 \quad (6.51)$$

を用いて、 u'_{n-1} , u_n , q'_{n-1} , q_n を消去すれば、

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q'_n \end{bmatrix} = {}_n Y \begin{bmatrix} u_1 \\ u'_n \end{bmatrix} \quad (6.52)$$

となる。ただし、 ${}_n Y$ は、1層から n 層までのアドミッタンス行列で、

$${}_n Y = \begin{bmatrix} {}_{n-1} Y_A - {}_{n-1} Y_B ({}_{n-1} Y_D + Y_{An})^{-1} Y_C & -{}_{n-1} Y_B ({}_{n-1} Y_D + Y_{An})^{-1} Y_{Bn} \\ Y_{Bn} ({}_{n-1} Y_D + Y_{An})^{-1} Y_C & Y_{An} - Y_{Bn} ({}_{n-1} Y_D + Y_{An})^{-1} Y_{Bn} \end{bmatrix} \quad (6.53)$$

である。このようにして漸次的に多層壁のアドミッタンス行列を求めることができる。

6.5 Laplace 逆変換

湿氣的にみて通常の壁体が非常に厚いため、精解法では十分な精度を確保するのに項数が多く必要になる。例えば極の値が -3 以下になるのに普通コンクリート100mmでも100項程度必要になる。また、極が必ず負の実数になるという保証がないため、松尾のアルゴリズム(Newton-Raphson法)ではうまくいかない場合があり、極を求めるのは存外やっかいである。そこで近似法の重要性が高まってくるのだが、地下壁体の応答を近似した手法いくつかの正のLaplaceパラメータを選び離散的に伝達関数を求めそれを数値Laplace逆変換するを用いることができる。既にLaplaceパラメータを正の実数としたときの伝達関数(アドミッタンス行列の各要素がそれぞれ温度動振熱流応答や温度動振水分流応答などに対する伝達関数となっている)は求められており、次のステップとして逆変換を行う。手法としては地中壁の応答を求める際に用いた固定公比法・最小2乗法の両手法を試みたが、最小2乗法ではFletcherの修正Marquardt法により安定化をはかったものの十分な精度で逆変換することができなかったため、固定公比法による結果のみをここでは示す。

固定公比法を用いる際、Laplaceパラメータとしてどのような系列を採用すべきかが重要な問題となる。壁体構成のみならず応答の種類によっても最適なパラメータ列は異なるであろう。しかし、個々のケースによって異なるパラメータ列を選ぶのは極力避けたい。固定公比法の利点は壁体によらず共通の公比を用いることにあるからである。熱水分同時移動の場合クロス応答が存在するため、応答種によらず共通の公比を用いればここでも若干の効率化がはかれる。

パラメータ列の範囲はどの程度の周期を対象とするかによって決定する。上限値は、負荷計算での計算時間間隔(1時間)によって決まり、 $10^{1.5}$ 程度を選ぶのが適当であろう。下限値は、年周期程度まで扱うつもりならば $10^{-5.5} \sim 10^{-5}$ 、日周期程度でよいなら $10^{-3} \sim 10^{-2.5}$ 程度にすればよい。下限値に関しては、単精度で計算する場合、有効桁数は10進法で6~7桁であるからこれも制約になる。パラメータ間の比(s_{i+1}/s_i)は地中壁に関しての検討を参考にして $\sqrt{10}$ を用いることにする。

検討する壁体は表6.1に示した3種類である。用いた物性値は表6.2に示した。室内側全応答を周波数領域で示す(図6.1~図6.3)。実線は周波数応答を直接求めた解である。室外側湿度動振水分流応答で近似精度が悪いようだが絶対誤差でみれば他の応答と大差はなく、すべての応答で妥当な近似が得られているといつてよいだろう。今回検討した壁体の応答にはそれほど長周期の成分が含まれていないため、下限を 10^{-3} としても 10^{-5} としたときとはほぼ同等の結果が得られる。なお、 s_0 として0を用いていないのは長周期成分が含

まれていたときに必要な周期の部分でも誤差が大きくなってしまふことがあるためであり、 $s_0 = 0.1s_1$ として逆変換することを推奨する。このようにした場合、短周期での精度は向上するが長周期の部分ではむしろ精度は悪くなることに注意されたい。図6.4にコンクリート100[mm]の室内側温度動振室内側水分流応答で上下限を変えて逆変換した場合の絶対誤差を比較したものを示す。固定公比法では伝達関数を直接近似するのではなく、ステップ応答のLaplace変換を近似しているため長周期の方が精度がよい。変換パラメータの持つ意味は明白で下限が小さい程長周期で、また上限が大きい程短周期で精度がよくなる。

表 6.1 検討した壁体

CASE 1	普通コンクリート 100mm
CASE 2	ALC100mm
CASE 3	木材 9mm + 中空層 + 普通コンクリート 100mm(室内側から室外側)

表 6.2 計算に用いた物性値

	$\lambda(\alpha)$	$\lambda'(\alpha')$	$c\rho$	κ	ν
	kcal/mhK	g/mh(g/kg')	kcal/m ³ K	g/m ³ (g/kg')	g/m ³ K
普通コンクリート	1.20	0.0017	462	3310	1772
ALC	0.15	0.0410	156	948	507
木材	0.15	0.0038	155	6590	3530
中空層	12.5	5.5	α [kcal/m ² hK], α' [g/m ² h(g/kg')]		
室内側表面	8.0	16.0	蒸発潜熱 $r=0.6$ [kcal/g]		
室外側表面	20.0	64.0	空隙内湿気容量は無視した.		

表 6.3 Laplace パラメータ

年周期用	$s_0 = 10^{-6}, s_k = 10^{-5}, 10^{-4.5}, \dots, 10^{1.5}$	(1+14 項)
日周期用	$s_0 = 10^{-4}, s_k = 10^{-3}, 10^{-2.5}, \dots, 10^{1.5}$	(1+10 項)

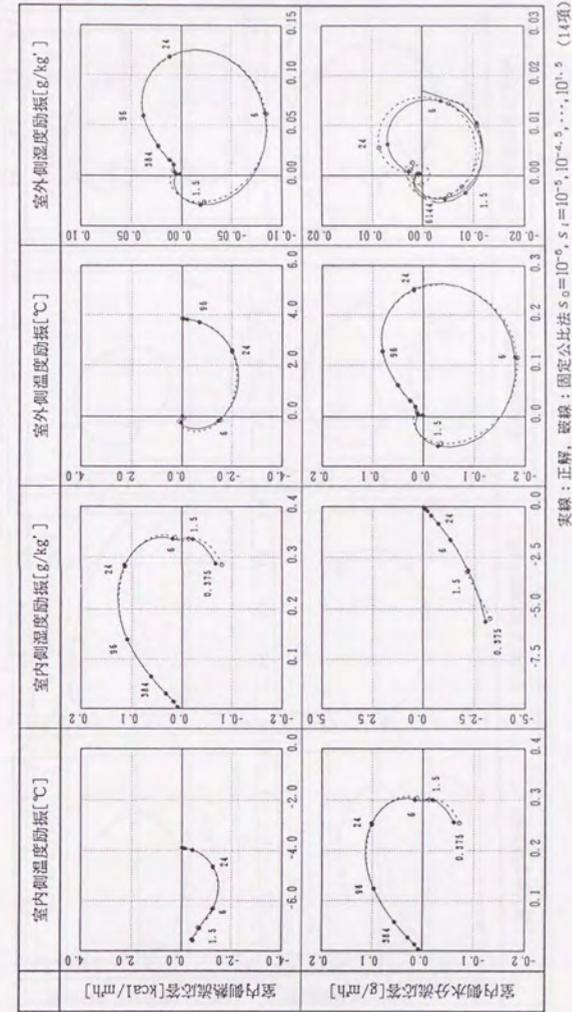


図 6.1 CASE 1 の伝達ベクトル

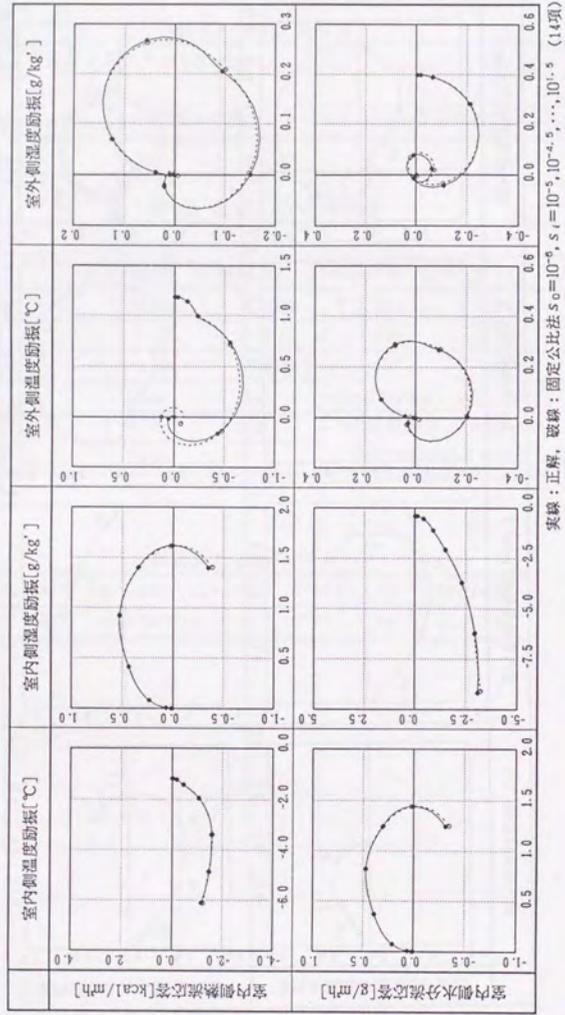


図 6.2 CASE 2 の伝達ベクトル

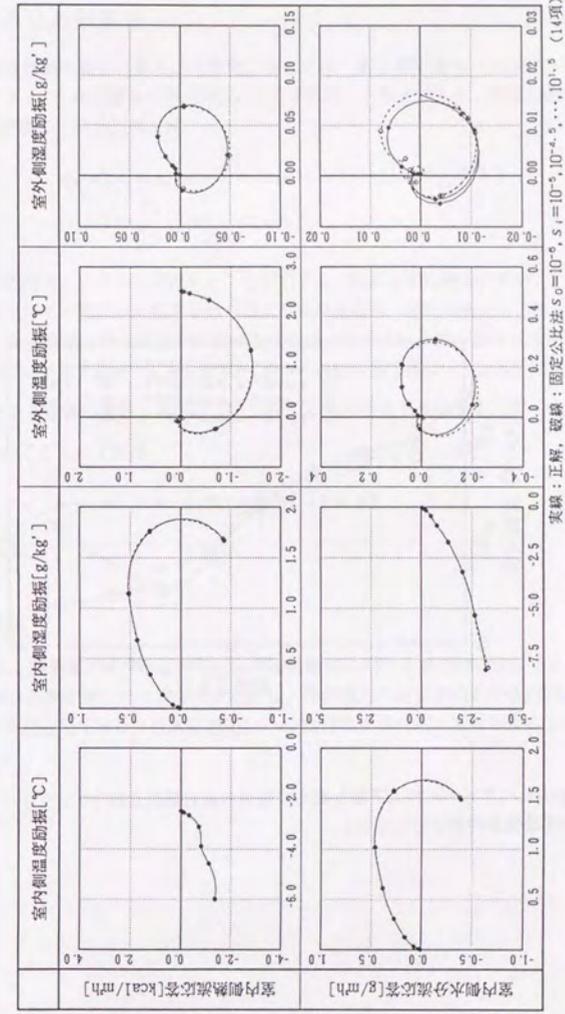


図 6.3 CASE 3 の伝達ベクトル

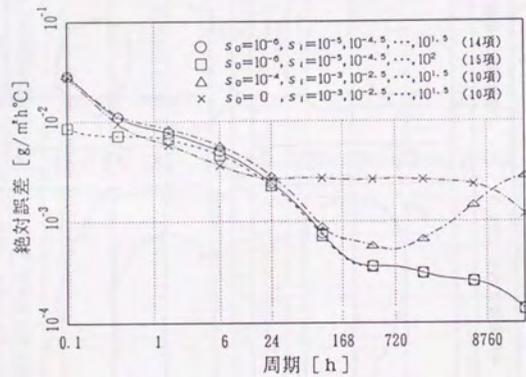


図 6.4 Laplace パラメータの上下限を変えた場合の絶対誤差比較 (コンクリート 100[mm] の室内側温度励振室内側水分流応答)

6.6 畳み込み計算法

熱水分同時移動の場合の畳み込み演算に関しては、第 2 章で述べた方法がほとんどそのまま適用できる。1 次元壁体の場合は、4 入力 4 出力システムであり、固定公比法を用いて Laplace 逆変換した場合、例えば、

$$q_k(n) = \rho_k q_k(n-1) + C_k u(n-1) \quad (k=1, \dots, K) \quad (6.54)$$

$$q(n) = \sum_{k=1}^K q_k(n) + C_0 u(n) \quad (6.55)$$

のような離散時間システムを構成することができる。熱水分同時移動の場合、1 つの励振-応答関係において 4 種類の応答すなわち温度励振熱流応答・湿度励振熱流応答・温度励振水分流応答・湿度励振水分流応答が存在する点を別にすれば熱単独の場合と全く同様な形式であり、特別な工夫を必要としない。式 (6.55) の右辺の第 1 項は $n-1$ ステップまでの状態によって決まり壁体の蓄熱、蓄湿によって生じる熱水分流を意味する。 $\bar{q}(n) = \sum_{k=1}^K q_k(n)$ 、 $Y = C_0$ とかくことにすれば、

$$q(n) = \bar{q}(n) + Y u(n) \quad (6.56)$$

と表現できる。

6.7 まとめ

本章では、第 2 章で述べた正の Laplace 変換領域における解を離散的に求め、それらに局所的な適合条件を課して有理多項式近似し、時間領域の解を求める手法 (固定公比法) を 1 次元線形熱水分同時移動方程式に適用し、10 数項で十分に応答近似できることを示した。

多次元形態及び熱水分同時移動を考慮した熱負荷計算法

7.1 はじめに

本章では、前章までで述べてきた壁体の応答特性から室内の温湿度・顕潜熱負荷を計算する方法について述べる。

温度及び顕熱負荷に関しては早い段階から非定常計算を行う負荷計算プログラムが開発され実用に供されているのに対して、湿度及び潜熱負荷に関して言えば、室内の湿度変動に壁体や室内備品の吸放湿が大きく影響していることは既に以前より指摘されていたにもかかわらず、基本的には定常計算しか行われてこなかった。しかし、湿気に関する現象の解明・モデル化が相当な水準に達した現在、非定常潜熱負荷計算の実用化に向けての研究が活発化してきている。

室内温湿度・負荷計算の理論的な話はかなり以前よりされているが、実用化にむけての研究は最近になるまであまりされてこなかった。松本 [65] は重み関数を用いた表現をしており、また、周期定常状態での解式も示されている。長谷川ら [30] はより詳細な理論を展開しており、多数室問題に関する一般的な表現を与えている。差分法を用いた計算法もいくつかなされており、金 [53]、石田ら [42]、宿谷ら [133] の研究がある。これらでは、表面付近を細かく分割して湿気容量を与えるがそれ以外はコンダクタンスのみを考慮したり、吸着熱は無視して熱は単独で解いたりして計算を簡略化している。差分法による例としては他に Wong [153] によるものなどいくつかある。3次元有限要素法によるプログラムも Fairey [24] らによって作成されている。

これまでの章では、壁体表面に接する流体温度と壁体表面熱流の関係を求める方法について述べてきた。そして、これらの関係はアドミッタンス表現することにより、どのよう

な離散化方法をとるにせよ、離散時間では、

$$q(n) = \bar{q}(n) + Y u(n) \quad (7.1)$$

の形の出力方程式にまとめられることを知った。ただし、 $u(n)$ は、境界温度、 $q(n)$ は境界熱流、 $\bar{q}(n)$ は蓄熱による項で $n-1$ ステップまでの値から求まり n ステップにおいては既知の熱流、 Y は直接伝送行列である。また、第6章で述べたように温度・熱流の関係を拡張して、 $u(n)$ を温湿度ベクトル、 $q(n)$ を熱水分流ベクトルとみれば式(7.1)はそのまま、熱水分同時移動の場合にもあてはまる。

式(7.1)より、非定常問題は n ステップにおける定常問題とみなして計算することができる。しかし、建築空間に壁体が置かれたときには、壁体表面から対流による空気への熱伝達や壁体相互の放射熱伝達が生じるが、そのことについてはこれまでまったく触れてこなかった。本章では、新たに室温と室供給熱量を境界条件としてシステムを記述しなおす。すなわち、システム合成により壁体表面温度などを内部節点として消去し、最終的に室温と室供給熱量の関係を導く方法について考察する。

本章では、記述を簡単にするため、システム合成などの手続きをへて、すべての壁体の出力方程式はまとめられているものとし、境界としてあらわれるのは、室及び外気のみであるものとする。これは、あくまで記述を容易にするため、適当にブロック対角化できる場合、すなわち、個々の壁体を独立に扱える場合は、各々の壁体について応答を計算した後、重ね合わせればよい。

7.2 放射熱伝達

7.2.1 放射吸収行列

Gebhaltの放射吸収係数 g_{ij} は閉空間において、

$$g_{ij} = \epsilon_j F_{ij} + \sum_{k=1}^{N_r} \rho_k F_{ik} g_{kj} \quad (7.2)$$

で定義されるもので i 面からの熱放射のうちで j 面で吸収されるものの割合を表している。ここで、 ϵ_i は面 i の放射率、 ρ_i は面 i の反射率($\rho_i = 1 - \epsilon_i$)、 F_{ij} は、 i 面から j 面への形態係数である。形態係数 F_{ij} には、 i 面の面積を A_i として、

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (7.3)$$

の相反則が成立している。

式(7.2)を行列で表現すると次のようになる。

$$G = F\epsilon + F\rho G \quad (7.4)$$

ただし、 $G = (g_{ij})$ 、 $F = (F_{ij})$ 、 $\epsilon = \text{diag}(\epsilon_i)$ 、 $\rho = \text{diag}(\rho_i) = I - \epsilon$ である(I は単位行列)。よって、形式的に G は、

$$G = (I - F\rho)^{-1} F\epsilon \quad (7.5)$$

7.2 放射熱伝達

となる。これを放射吸収行列と呼ぶことにする。複数の閉空間がある場合は、ある閉空間に面する壁体の番号が連続するように番号づければ、各閉空間ごとにブロック対角の行列となる。 $A = \text{diag}(A_i)$ とすれば形態係数の相反則は $F' = AF$ が、

$$F'^T = (AF)^T = AF = F' \quad (7.6)$$

と対称行列であることと同値である。 G の各行に各面の面積と吸収係数を乗じたものは、

$$\epsilon AG = \epsilon(F'^{-1} - \rho A^{-1})^{-1} \epsilon \quad (7.7)$$

とかけるので、 $(F'^{-1} - \rho A^{-1})$ 、 ϵ が対称行列であることからやはり対称行列となることがわかる。

7.2.2 等価気温

等価気温(Equivalent Temperature)は、放射の影響を加味した気温で外壁面においては相当外気温(SAT: Sol Air Temperature)と呼ばれている。室内においては、環境温度(Environment Temperature)、作用温度(Operative Temperature)¹などの呼び名もあるが、ここでは等価気温という名称を使用することにする。等価気温は、厳密には各壁表面において定義されるものである。 i 壁表面に周囲から流入する熱は下式のようなになる。

$$q_{Ti} = \alpha_{ci} A_i (T_i - T_{Wi}) + \sum_j \alpha_{ri} A_i g_{ij} (T_{Wj} - T_{Wi}) + \bar{q}_{ri} \quad (7.8)$$

ただし、 T_i は流体温度、 T_{Wi} は i 壁表面温度で、 α_{ci} 、 α_{ri} はそれぞれ i 壁表面の対流熱伝達率、放射熱伝達率²、 A_i は i 表面の面積³、 g_{ij} はGebhaltの放射吸収係数、また、 \bar{q}_{ri} は壁以外からの放射による熱取得で室内発熱機器からの放射や透過日射などはこれに含める。さて、 q_{Ti} を、

$$q_{Ti} = \alpha_{ti} A_i (T_i^e - T_{Wi}) \quad (7.9)$$

と表現したい(図7.1)。ただし、 T_i^e は等価気温、 α_{ti} は総合熱伝達率で、

$$\alpha_{ti} = \alpha_{ci} + \alpha_{ri} \quad (7.10)$$

である。式(7.8)、式(7.9)が等しいとして等価気温 T_i^e を計算すると、

$$T_i^e = \frac{\alpha_{ci}}{\alpha_{ti}} T_i + \sum_j \frac{\alpha_{ri}}{\alpha_{ti}} g_{ij} T_{Wj} + \frac{\bar{q}_{ri}}{\alpha_{ti} A_i} \quad (7.11)$$

となる。ただし、 $\sum_j g_{ij} = 1$ の関係を用いた。このようにして定義される等価気温と総合熱伝達率を用いれば、従来の負荷計算体系をほとんど変更することなく適用できて便利である。この式が各壁面において成立していることからこれをベクトルで表現すると、

$$T^e = \alpha_t^{-1} \alpha_c T + \alpha_t^{-1} \alpha_r G T_W + \alpha_t^{-1} A^{-1} \bar{q}_r \quad (7.12)$$

¹これは人体の温冷感指標の1つだが壁などに対しても使われることもある。

²すなわち、放射伝熱に関して鏡形近似している。建築伝熱では線形で扱ってほとんどの場合問題ない。

³有限要素法の場合は i 節点が代表する面積とみなせばよい。

となる。ただし、 $T = [T_i]^T$, $T^e = [T_i^e]^T$, $T_W = [T_{Wj}]^T$, $\bar{q}_r = [\bar{q}_{ri}]^T$ で、 $\alpha_t = \text{diag}(\alpha_{ti})$, $\alpha_c = \text{diag}(\alpha_{ci})$, $\alpha_r = \text{diag}(\alpha_{ri})$, $A = \text{diag}(A_i)$ であり、また、 $G = (g_{ij})$ は式(7.5)で定義されるGebhaltの放射吸収行列である。

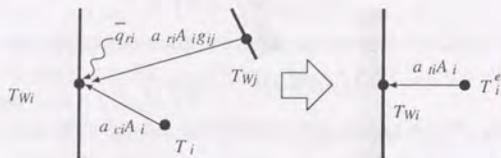


図 7.1 等価気温

さて、等価気温を各壁面ごとに決めるためには放射吸収行列を計算する必要があるが、このためには面と面の幾何学的な関係をきちんと記述しておく必要があること、また、記述されていてもそれを計算するのはなかなか大変であることから、簡単な仮定を設けて放射吸収行列を決定し、計算や入力の種類さを避ける方法が松尾 [87] によって提案されている。ここでは、この簡易化手法について説明する。 A_i を i 壁表面の面積として、 A_{Rj} を、

$$A_{Rj} = \sum_{j\text{室に面する壁}} A_i \quad (7.13)$$

すなわち、 j 室に面する壁の総表面積として定義する。また、室温をそれぞれの室に対して 1 点で代表させて $T_R = [T_{Ri}]^T$ とすれば、各壁表面に接する空気温度は等しくして、

$$T = K T_R \quad (7.14)$$

とかけると、ここで、 $K = (K_{ij})$ は、室と壁表面を結び付けるインデックス行列であり、壁表面 i が室 j に面しているとき $K_{ij} = 1$ で他は 0 の行列である。このインデックス行列 K を用いれば、 $A = \text{diag}(A_i)$ として、室の総表面積を対角要素としてもつ $A_R = (A_{Ri})$ は、

$$A_R = K^T A K \quad (7.15)$$

と表現することができる。松尾の仮定は、ある室に面する壁表面のGebhaltの放射吸収係数を壁の面積の室総表面積に占める割合で近似するものであって、この仮定を適用すれば、上記の記号を用いてGebhaltの放射吸収行列 G を、

$$G = K A_R^{-1} K^T A \quad (7.16)$$

と求めることができる。この行列は実際には各室ごとにブロック対角化することができるので単純な行列である。式(7.16)によって G を決定し、更に i 室の壁表面の熱伝達率がすべて等しく α_{Rci} 等々で、かつ放射密度も一定であると仮定すれば、 i 室の等価気温 T_{Ri}^e が唯一

まる。すなわち、 $T_{Ri}^e = [T_{Ri}^e]^T$, $T_R = [T_{Ri}]^T$, $\alpha_{Rc} = \text{diag}(\alpha_{Rci})$ 等々、また $\bar{q}_{Rr} = [\bar{q}_{Rri}]^T$ とベクトル・行列表示することにすれば、式(7.12)より、

$$T_{Ri}^e = \alpha_{Ri}^{-1} \alpha_{Rc} T_R + \alpha_{Ri}^{-1} \alpha_{Rr} T_{RW} + \alpha_{Ri}^{-1} A^{-1} \bar{q}_{Rr} \quad (7.17)$$

となる。ただし、 T_{RW} は、

$$T_{RW} = A_R^{-1} K^T A T_W \quad (7.18)$$

で室の面積荷重平均の壁表面温度ベクトルである。

7.3 室内温湿度・空調負荷計算

本節では、熱水分同時移動を考慮した室内温湿度・空調負荷計算法について述べる。湿度の湿度の相互作用項をなくせばそのままそれぞれが独立な場合についても成立するので、重複を避けるため熱単独で扱う場合については省略することにする。

7.3.1 壁体の応答

本章では、連続時間システムは扱わず、離散時間システムに限定して話を進める。第2章、第6章で述べたように⁴、また本章のはじめでも述べたように、スペースに面する壁表面の熱水分流はどのような離散化手法をとるにせよ、スペースの温湿度を境界入力として同じ形式で表現することができる。今、境界(壁の表面)を n 個に分割して、それぞれの部分境界を Γ_i とすれば、 Γ_i に励振を与えたとき、すなわち、 Γ_i に接する流体の温度もしくは湿度を 1 とし他の部分境界に接する流体の温湿度を 0 としたとき、応答が 4 種類定まる。すなわち温度励振熱流応答・湿度励振熱流応答・温度励振水分流応答・湿度励振水分流応答の 4 種類である。応答の計算法についてはすでに述べた。1次元壁体も含めてすべての表面に番号をつけ、

$$u = \begin{bmatrix} T^e \\ X \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

$$q = \begin{bmatrix} q_T \\ q_X \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

というベクトルを考える。ここで、 $T^e = [T_i^e]^T$ は壁表面に接する空気等価温度ベクトル、 $X = [X_i]^T$ は同絶対湿度ベクトルである。すると、壁体の応答は、

$$q(n) = \bar{q}(n) + Y u(n) \quad (7.21)$$

のように表現することができる。ここで、 $\bar{q}(n)$ は n ステップで既知の熱水分流ベクトルであり、また、 Y は、

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{TT} & Y_{TX} \\ Y_{XT} & Y_{XX} \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

⁴第2章では伝熱問題しか扱っていないが、熱容量行列に相当する熱水分容量行列を考えた場合、対称行列にはならないため若干の拡張を要する他はほぼ類似の考えが成立する。

で、 $Y_{TT} = (Y_{TTij})$ は壁表面 j に温度変動を与えたときの壁表面 i での熱流応答に関する直接伝送行列である。 Y_{TX} , Y_{XT} , Y_{XX} についても同様とする。壁表面の総数は N^* とするが、このうち、境界に接する空気の状態温度・絶対湿度が既知であるものを除いた壁表面の数を N とする。1次元の壁体みの場合は、壁体の表と裏が連続になるように番号づければ Y_{TT} 等は 2×2 のブロック対角行列である。

7.3.2 室内熱水分バランス

n ステップにおける問題のみを扱うので、式(7.21)で n を省略し、

$$q = \bar{q} + Y u \quad (7.23)$$

もしくは、

$$q_T = \bar{q}_T + Y_{TT} T^e + Y_{TX} X \quad (7.24)$$

$$q_X = \bar{q}_X + Y_{XT} T^e + Y_{XX} X \quad (7.25)$$

と記すことにする。壁表面温度ベクトル、壁表面絶対湿度ベクトルをそれぞれ T_W , X_W とすれば、壁表面熱流・水分流は、

$$q_T = \alpha_t A (T_W - T^e) \quad (7.26)$$

$$q_X = \alpha' A (X_W - X) \quad (7.27)$$

ともかける。ただし、 $A = \text{diag}(A_i)$ で A_i は i 壁の表面積である。式(7.24)と式(7.26)、また、式(7.25)と式(7.27)の左辺が等しいとおき、未知数を左辺に移項し、次のようにする。

$$\alpha_t A T_W - (\alpha_t A + Y_{TT}) T^e - Y_{TX} X = \bar{q}_T \quad (7.28)$$

$$\alpha' A X_W - Y_{XT} T^e - (\alpha' A + Y_{XX}) X = \bar{q}_X \quad (7.29)$$

式(7.28)、式(7.29)で壁表面に接する空気の状態温度、湿度が既知のものに関しては右辺に移項し、 q_T , q_X に含めて考え、式からも省かれたものとする。ベクトル、行列のサイズは N^* から N に減少しているが、同じ記号を用いることにする。7.2.2で定義したように、状態温度ベクトル T^e は、

$$T^e = \alpha_t^{-1} \alpha_c T + \alpha_t^{-1} \alpha_r G T_W + \alpha_t^{-1} A^{-1} \bar{q}_r \quad (7.30)$$

であり、また、インデックス行列 K を用いて T , X は、室温 T_R , 室絶対湿度 X_R と、

$$T = K T_R \quad (7.31)$$

$$X = K X_R \quad (7.32)$$

の関係で結びつけられる。

一方、室の熱水分バランスでは、壁から対流によって伝わる熱量・水分量の他に、スペース間の換気による熱水分移動や、室の発熱、水蒸気発生、家具などによる蓄熱・蓄水分について考えなければならない。まず、壁から対流によって伝わる熱量 Q_{cW} ・水分量 Q_{XW} は、

$$Q_{cW} = K^T \alpha_c A (T_W - T) \quad (7.33)$$

$$Q_{XW} = K^T \alpha' A (X_W - X) \quad (7.34)$$

となる。ただし、 $\alpha' = \text{diag}(\alpha'_i)$ で α'_i は、 i 壁の湿気伝達率である。次に、スペース間の換気による熱水分移動についてだが、室 j から室 i に流入する空気量が別途 V_{Rij} と求められているならば、 $V_R = (V_{Rij})$ 、ただし、 $V_{Rii} = -\sum_{j \neq i} V_{Rij}$ という行列を考えれば、換気によって伝わる熱量 Q_{cV} 、水分量 Q_{XV} は、

$$Q_{cV} = c_a \rho_a V_R T_R \quad (7.35)$$

$$Q_{XV} = \rho_a V_R X_R \quad (7.36)$$

となる。ただし、 c_a は空気の比熱、 ρ_a は空気の密度である。また、家具などによる蓄熱・蓄水分については、壁と同様に扱うのが本来だが、便宜的に室の熱容量、水分容量とみなしてしまうことが熱負荷計算ではよく行われる。この場合、表面積が特定できないので室空気の熱水分容量と同一視せざるをえず、これを含めて室空気の熱水分容量を C_R , C'_R とすれば、 n ステップにおける室の蓄熱項を、

$$C_R \dot{T}_R(n) = \frac{C_R}{\Delta t} (T_R(n) - T_R(n-1)) \quad (7.37)$$

$$C'_R \dot{X}_R(n) = \frac{C'_R}{\Delta t} (X_R(n) - X_R(n-1)) \quad (7.38)$$

と近似して、更に、

$$\bar{Q}_{ca} = \frac{C_R}{\Delta t} T_R(n-1) \quad (7.39)$$

$$\bar{Q}_{Xa} = \frac{C'_R}{\Delta t} X_R(n-1) \quad (7.40)$$

$$Y_{ca} = -\frac{C_R}{\Delta t} \quad (7.41)$$

$$Y_{Xa} = -\frac{C'_R}{\Delta t} \quad (7.42)$$

とおけば、 n ステップであることを省略して、

$$Q_{ca} = \bar{Q}_{ca} + Y_{ca} T_R \quad (7.43)$$

$$Q_{Xa} = \bar{Q}_{Xa} + Y_{Xa} X_R \quad (7.44)$$

と表現することができる。無論、 \bar{Q}_{ca} , \bar{Q}_{Xa} は別の形で求められていてもよい。実際、HASP では応答係数の形で表現されている。さて、室発熱量の対流成分を Q_{cI} 、水分発生量を Q_{XI}

とし、更に、室供給熱量を Q_{TS} 、室供給水分量を Q_{XS} とすると、以上をまとめて、室の熱水分収支、

$$Q_{eW} + Q_{eV} + Q_{ca} + Q_{cl} + Q_{TS} = 0 \quad (7.45)$$

$$Q_{XW} + Q_{XV} + Q_{Xa} + Q_{XI} + Q_{XS} = 0 \quad (7.46)$$

より、

$$(Y_{ca} + c_a \rho_a V_R) T_R + K^T \alpha_c A T_W - K^T \alpha_c A T + Q_{cl} + Q_{TS} + \bar{Q}_{ca} = 0 \quad (7.47)$$

$$(Y_{Xa} + \rho_a V_R) X_R + K^T \alpha' A X_W - K^T \alpha' A X + Q_{XI} + Q_{XS} + \bar{Q}_{Xa} = 0 \quad (7.48)$$

以上の、式(7.28)-(7.32)、式(7.47)、(7.48)で、方程式の数は室の数を N_R として $5N + 2N_R$ 、未知数は、 T 、壁面温度 T_W 、壁面湿度 X_W 、等価温度 T^e 、室温 T_R 、室温湿度 X_R 及び供給熱量 Q_{TS} 、供給水分量 Q_{XS} で $5N + 4N_R$ である。よって、これらの式と室温湿度と供給熱水分量を結び付ける、空調システムにかかわる方程式が $2N_R$ あれば、 n ステップにおける状態をすべて決定することができる。

7.2.2で述べた放射吸収行列 G に対する松尾の仮定を用いると計算式ははるかに単純になる。すなわち、式(7.17)のように室に接する流体の等価温度が唯一定まるため、以下のよう整理することが可能になる。

$$\begin{bmatrix} \Phi_{TT}^* + \alpha_{Rc} A_{Rc} & \alpha_{Ri}^{-1} \alpha_{Rc} \Phi_{TT} - \alpha_{Rc} A_{Rc} & \alpha_{Ri}^{-1} \alpha_{Rc} \Phi_{TX} \\ -\alpha_{Rc} A_{Rc} & \alpha_{Ri}^{-1} \alpha_{Rr} \Phi_{TT} + \alpha_{Rc} A_{Rc} & \alpha_{Ri}^{-1} \alpha_{Rr} \Phi_{TX} \\ O & \Phi_{XT} & \Phi_{XX}^* + \Phi_{XX} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_R \\ T_R^e \\ X_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_c \\ \bar{Q}_r \\ \bar{Q}_X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{TS} \\ o \\ Q_{XS} \end{bmatrix} \quad (7.49)$$

ここに、

$$\bar{Q}_c = \alpha_{Ri}^{-1} \alpha_{Rc} K^T \bar{q}_T + \bar{Q}_{cl} \quad (7.50)$$

$$\bar{Q}_r = \alpha_{Ri}^{-1} \alpha_{Rr} K^T \bar{q}_T + \bar{Q}_{ri} \quad (7.51)$$

$$\bar{Q}_X = K^T \bar{q}_X + Q_{XI} \quad (7.52)$$

$$\Phi_{TT} = -K^T Y_{TT} K \quad (7.53)$$

$$\Phi_{TX} = -K^T Y_{TX} K \quad (7.54)$$

$$\Phi_{XT} = -K^T Y_{XT} K \quad (7.55)$$

$$\Phi_{XX} = -K^T Y_{XX} K \quad (7.56)$$

$$\Phi_{TT}^* = -Y_{ca} - c_a \rho_a V_R \quad (7.57)$$

$$\Phi_{XX}^* = -Y_{Xa} - \rho_a V_R \quad (7.58)$$

なお、等価室温を消去した形は多数室の場合多少複雑になるので省略するが、単室であれば、

$$\begin{bmatrix} \Phi_{TT}^* + \frac{\Phi_{TT}}{1 + \mu \Phi_{TT}} & \frac{\Phi_{TX}}{1 + \mu \Phi_{TT}} \\ \frac{\Phi_{XT}}{1 + \mu \Phi_{TT}} & \Phi_{XX}^* + \Phi_{XX} - \frac{\mu \Phi_{TX} \Phi_{XT}}{1 + \mu \Phi_{TT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_R \\ X_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_c + \frac{\alpha_{Rc}}{\alpha_{Ri}} \bar{Q}_T + \frac{1}{1 + \mu \Phi_{TT}} \left(1 - \frac{\Phi_{TT}}{\alpha_{Ri} A_{Rc}} \right) \bar{Q}_r \\ \bar{Q}_X - \frac{1}{1 + \mu \Phi_{TT}} \frac{\Phi_{XT}}{\alpha_{Rc} A_{Rc}} \bar{Q}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{TS} \\ Q_{XS} \end{bmatrix} \quad (7.59)$$

但し、

$$\mu = \frac{\alpha_{Rr}}{\alpha_{Ri} \alpha_{Rc} A_{Rc}} \quad (7.60)$$

となる。

7.3.3 室内温湿度・負荷計算

室内温湿度及び負荷を計算するためには室内バランス式の他に空調システム側の条件が必要である。しかし、空調システムの構成は多岐にわたり、簡単に記述できるようなものではない。したがって、以降では、最も単純な単一ダクトCAV方式(図7.2)で室温による制御が行われる場合を想定し、なおかつ単室の場合についてのみ述べ、熱水分同時移動を考慮した場合の考え方を示すにとどめる。

室内湿度が制御できるようなシステムでは室内湿度が設定値に保たれるものとして、室に供給すべき熱量 Q_{TS} ・水分量 Q_{XS} を決定してもよいだろうが、そうであれば、空調システム側の条件を考えるまでもなく、式(7.59)にしたがって計算すればよい。しかし、一般的には湿度は成りゆきの場合が多いのでこの場合についても考えておく必要がある。金[53]は、同様のケースについて計算法を示しているが、金の計算方法は、壁体の応答で湿度はそのステップの湿度と関連しないため、ここで示す計算と同一視することはできない。また、過負荷時は壁体の計算の部分まで遡って修正しているが、ここで示す計算法はその必要がなく、室温湿度と空調システムで完結しているので、はるかに計算効率が良い。

室の熱水分収支式(7.59)をあらためて、

$$\begin{bmatrix} \Phi_{TT} & \Phi_{TX} \\ \Phi_{XT} & \Phi_{XX} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_R \\ X_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_T \\ Q_X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{TS} \\ Q_{XS} \end{bmatrix} \quad (7.61)$$

とおく。また、室供給熱量 Q_{TS} 、室供給水分量 Q_{XS} は、吹出温湿度を、 T_S 、 X_S 、吹出風量(固定)を V_S として、

$$Q_{TS} = c_a \rho_a V_S (T_S - T_R) \quad (7.62)$$

$$Q_{XS} = \rho_a V_S (X_S - X_R) \quad (7.63)$$

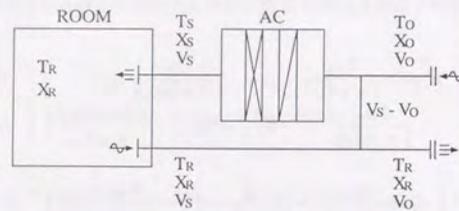


図 7.2 単一ダクト CAV

である。空調機における熱水分取支は、装置供給熱水分量を、 H_T 、 H_X (潜熱量とするときは蒸発潜熱 r を乗じて rH_X とする、以下同様)、室供給熱水分量を H_{TR} 、 H_{XR} 、外気による供給熱水分量を H_{TO} 、 H_{XO} 、また、外気温湿度を T_O 、 X_O 、外気導入量を V_O として、

$$H_T = H_{TR} + H_{TO} = Q_{TS} + c_a \rho_a V_O (T_R - T_O) \quad (7.64)$$

$$H_X = H_{XR} + H_{XO} = Q_{XS} + \rho_a V_O (X_R - X_O) \quad (7.65)$$

となる。これらの式をもとにして各空調状態の負荷もしくは温湿度を求める式を具体的に示す。

7.3.3.1 無負荷 (自然室温湿度)

式(7.61)で、 $H_T = 0$ 、 $H_X = 0$ とおいて、

$$\begin{bmatrix} T_R \\ X_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{TT} + c_a \rho_a V_O & \Phi_{TX} \\ \Phi_{XT} & \Phi_{XX} + \rho_a V_O \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Q_T + c_a \rho_a V_O T_O \\ Q_X + \rho_a V_O X_O \end{bmatrix} \quad (7.66)$$

となる。

7.3.3.2 軽負荷 (暖房時・冷房時乾きコイル)

室温は設定値となり、また室に供給される水分は外気導入による分だけである。すなわち、室温設定値を $T_R = \bar{T}_R$ 、 $H_X = 0$ として、式(7.61)から、

$$X_R = \frac{Q_X + \rho_a V_O X_O - \Phi_{XT} \bar{T}_R}{\Phi_{XX} + \rho_a V_O} \quad (7.67)$$

$$H_T = \Phi_{TT} \bar{T}_R + \Phi_{TX} X_R - Q_T \quad (7.68)$$

なお、このときの吹出温湿度は、

$$T_S = T_R + \frac{H_T}{c_a \rho_a V_S} \quad (7.69)$$

$$X_S = \frac{V_S - V_O}{V_S} X_R + \frac{V_O}{V_S} X_O \quad (7.70)$$

だが、計算された吹出口湿度が飽和絶対湿度を超えた場合には冷房と同時に除湿も行われることになり、次の湿りコイルの場合の計算法によらなければならない。

7.3.3.3 軽負荷 (冷房時湿りコイル)

湿りコイルの場合は、吹出湿度 X_S が、吹き出し温度 T_S における飽和絶対湿度 $X_{SAT}(T_S)$ を用いて、

$$X_S = 0.95 X_{SAT}(T_S) \quad (7.71)$$

となるものとする。室側の条件から別に、

$$X_S = a T_S + b \quad (7.72)$$

ただし、

$$a = \frac{c_a \rho_a V_S (\Phi_{XX} + \rho_a V_S)}{\rho_a V_S \Phi_{TX}} \quad (7.73)$$

$$b = \frac{1}{\rho_a V_S} \left\{ \frac{\Phi_{XX} + \rho_a V_S}{\Phi_{TX}} Q_T - Q_X + (\Phi_{XT} - \Phi_{TT} - c_a \rho_a V_S) \bar{T}_R \right\} \quad (7.74)$$

が成り立たなければならないから、

$$f(T_S) = 0.95 X_{SAT}(T_S) - a T_S - b = 0 \quad (7.75)$$

を解いて T_S を求める。式(7.75)は非線形方程式だが Newton-Raphson 法で容易に解くことができる。 T_S 、 X_S が求まれば、室温などは以下の式から求まる。

$$X_R = \frac{1}{\Phi_{XX} + \rho_a V_S} (Q_X + \rho_a V_S X_S - \Phi_{XT} \bar{T}_R) \quad (7.76)$$

$$H_{TR} = c_a \rho_a V_S (T_S - \bar{T}_R) \quad (7.77)$$

$$H_{XR} = \rho_a V_S (X_S - \bar{X}_R) \quad (7.78)$$

7.3.3.4 過負荷 (暖房時・冷房時乾きコイル)

7.3.3.3で求めた H_{TR} と外気負荷 H_{TO} の和が装置容量を超えた場合は設定室温に維持することはできない。このときは装置容量を \bar{H} として、 $H_T = \bar{H}$ が成り立っているので、

$$\begin{bmatrix} T_R \\ X_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{TT} + c_a \rho_a V_O & \Phi_{TX} \\ \Phi_{XT} & \Phi_{XX} + \rho_a V_O \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Q_T + c_a \rho_a V_O T_O + \bar{H} \\ Q_X + \rho_a V_O X_O \end{bmatrix} \quad (7.79)$$

となる。

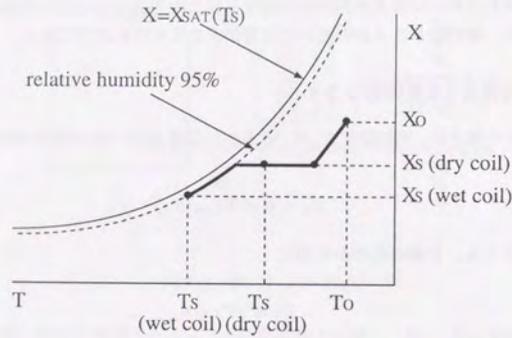


図 7.3 吹出口温湿度

7.3.3.5 過負荷 (冷房時湿りコイル)

7.3.3.4で過負荷の場合は,

$$\bar{H} = H_T + rH_X \quad (7.80)$$

が成り立っている。ただし、 r は水の蒸発潜熱であり、厳密には温度の関数だが一定値とみなす。一方、式(7.61)、式(7.62)、式(7.63)より、

$$\begin{bmatrix} \Phi_{TT} & \Phi_{TX} \\ \Phi_{XT} & \Phi_{XX} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_R \\ X_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_T \\ Q_X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_a \rho_a V_S (T_S - T_R) \\ \rho_a V_S (X_S - X_R) \end{bmatrix} \quad (7.81)$$

これを、 T_R 、 X_R について解くと、

$$\begin{bmatrix} T_R \\ X_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_S \\ X_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (7.82)$$

ただし、

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{TT} + c_a \rho_a V_S & \Phi_{TX} \\ \Phi_{XT} & \Phi_{XX} + \rho_a V_S \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} c_a \rho_a V_S & 0 \\ 0 & \rho_a V_S \end{bmatrix} \quad (7.83)$$

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{TT} + c_a \rho_a V_S & \Phi_{TX} \\ \Phi_{XT} & \Phi_{XX} + \rho_a V_S \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Q_T \\ Q_X \end{bmatrix} \quad (7.84)$$

これから、

$$\bar{H} = cT_S + dX_S + e \quad (7.85)$$

ただし、

$$c = c_a \rho_a V_S + (c_a \rho_a V_O - c_a \rho_a V_S) A_{11} + r(\rho V_O - \rho V_S) A_{21} \quad (7.86)$$

$$d = r \rho_a V_S + (c_a \rho_a V_O - c_a \rho_a V_S) A_{12} + r(\rho V_O - \rho V_S) A_{22} \quad (7.87)$$

$$e = -c_a \rho_a V_O T_R - r \rho_a V_O X_O + (c_a \rho_a V_O - c_a \rho_a V_S) B_1 + r(\rho_a V_O - \rho_a V_S) B_2 \quad (7.88)$$

である。式(7.75)と同様に、 $X_S = X_{SAT}(T_S)$ とにおいて、式(7.85)から、

$$f(T_S) = 0.95dX_{SAT}(T_S) + cT_S + (e - \bar{H}) = 0 \quad (7.89)$$

を解いて吹き出し温度 T_S を求めれば、吹き出し湿度 X_S も得ることができる。 T_S 、 X_S が決まれば、から式(7.82)を用いて T_R 、 X_R を求めることができる。

7.4 まとめ

本章では、室温と室供給熱量を境界条件としてシステムを記述しなおし、室内温湿度・顕潜熱負荷計算法として提示した。特に、壁体の相互放射を考慮した場合の簡易化について詳述した。また、湿度が成行きの場合の空調システムとの連成の例として、単一ダクトCAV方式の場合を取り上げ、コイル状態や軽負荷・過負荷時など空調状態の変化を考慮した計算式を具体的に示した。

地下室つき住宅の実測データ解析

8.1 はじめに

本章では、茨城県つくば市にある建設省建築研究所敷地内に建てられた地下室つき実験住宅の実測データをもとに、数値シミュレーションによる検討を行う。

本実験棟は本来地上部分と地下部分の一体利用検討を課題として建てられたもので、1台の空調機で1階と地階の両方を空調し負荷の状況によっては上下階の換気のみを行うことで地中熱の有効利用をはかり、省エネルギーを追求しようというものである [92]。この実験については、既報 [110] において3次元有限要素法による数値シミュレーションを行っているが、地階と1階の空調負荷が分離して測定されておらず、1階部分の負荷のほうが大きく誤差要因も多いことを考慮すると地下室熱特性把握という観点からは曖昧な点が残った。そこで本実験終了後、1階床部分に断熱材を敷き詰め上下階換気を止めて地下室のみの熱特性把握のための実験が行われた。本章ではこのデータを利用し、地下壁体の熱負荷に対する検討を中心に考察する。また、実測では地中温度を測定しているので、本論文では触れることが少なかった地中温度分布についても検討を行う。地中温度分布に関する検討も行うため、空間領域は3次元差分法で、また、時間領域は後退差分法による離散化して計算する。水分蒸発や日影も考慮して地表面境界条件の設定を行い、その影響について検討するとともに、地下壁の部位別の熱負荷を算出し、その熱特性を明らかにする。

8.2 実測の概要

実験棟は、茨城県つくば市にある建設省建築研究所敷地内に建設された。竣工は1988年12月である。地下室はPC板を用いたケーソン工法であり、上屋は鉄骨造で外装はALCパネルである。規模は、1階地階とも、 $5.5[m] \times 5.5[m] = 30.25[m^2]$ で、容積は1階が $74[m^3]$ 、地階が $76[m^3]$ である。地下室の壁は、地表面から1[m]の位置まで50[mm]の外断熱が、また地上部分は80[mm]の外断熱が施されている。1階も、外断熱であり、開口部は気密・断熱サッシ、ドアである。換気システムは全熱交換換気で、空調は換気システムと独立している。当初は1階地階の一体利用の検討を目的としていたため、換気、空調システムは上下階それぞれに1箇所ずつ吹き出し口と吸い込み口があり吹き出し吸い込みのパターンを変えられるようになっていたが、本実験終了後、1階に独立の空調機を設置し、換気は地階のみと1階、地階で完全に独立の制御が可能ないように変更している。1階床には硬質ポリウレタン50[mm]を引き詰め、階段開口部はスタイロフォーム100[mm]でふさいでいる。1階空調機は地階とできるだけ同じ室温を保つように制御している。

以上のように、地下室のみの熱特性把握ができるように仕様を変更した後、地階を居間としての利用を想定して、内部発熱560[W]を間欠で与え、冷房設定温度26[°C]、暖房設定温度20[°C]で間欠空調を行った。また、地階の換気は換気回数を0.5[回/h]とするため、38[m³/h]で常時一定としたが、全熱交換器はそのまま設置されている。実験棟の生活パターンを図8.4に示す。

この地下室のみの熱特性把握を目的とした実験は1992年7月から1994年9月まで行われたが、本論文では、1993年を主な解析対象としている。

8.3 外界気象条件

実験では、外界気象要素として温湿度、水平面日射量などを測定しているが、欠測や異常値が多くシミュレーションには利用しにくいいため、近くの館野の気象データ(気象庁SDPファイル)で代用する。日射の直散分離には宇田川の方法を、夜間放射量に関しては日照率から推定する二宮の方法を用いた¹。図8.5にシミュレーションに用いた館野の気象データを示す。

8.4 地表面熱収支と地盤物性

8.4.1 地表面熱収支

地下室の熱負荷について論じる前に地表面の熱収支をまず押えておく必要がある。地表面の熱収支は気象学の分野を中心に非常に多くの研究が行われている。実験棟の周辺は雑草が生い茂っており、植生の状況を考慮してモデル化を行わなくてはならないが、地表面温度と葉の温度を同じであるとみなして以下のように近似してもフラックスは比較的良好

¹館野では詳細な放射観測が行われているが本論文では利用していない。

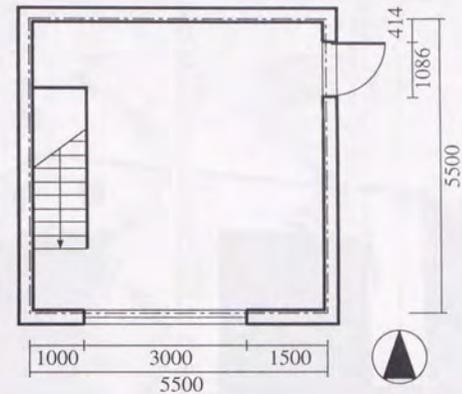


図8.1 実験棟平面(1階)

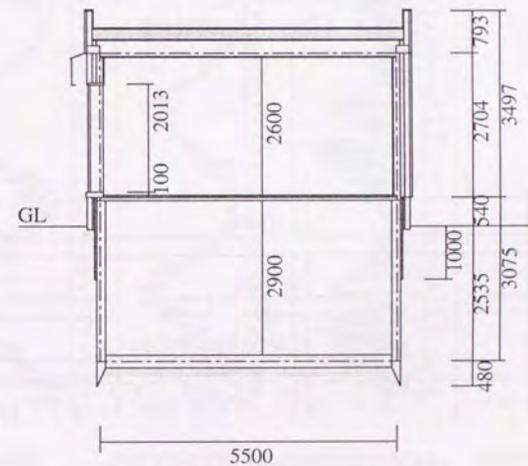


図8.2 実験棟断面



図 8.3 南東からみた実験棟概観

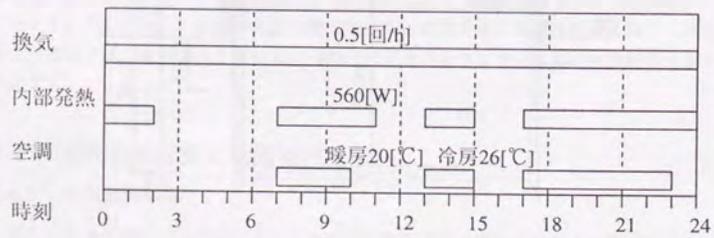


図 8.4 実験棟生活パターン (居間を想定)

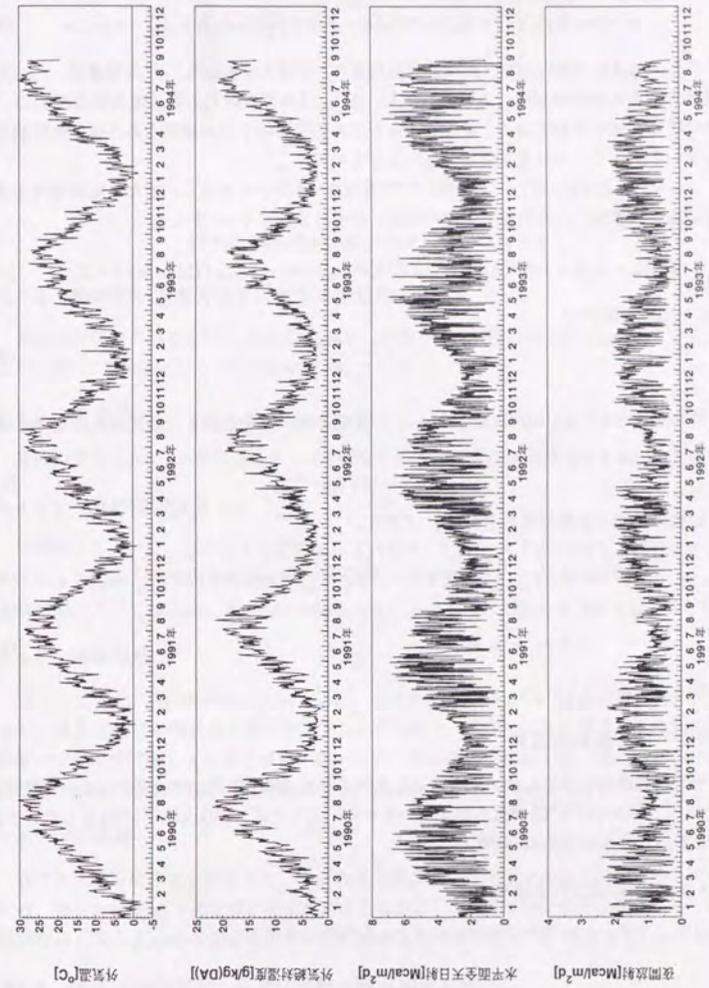


図 8.5 外界条件として使用した館野の気象データ

い精度で評価できることがわかっている [58].

$$q = (\alpha_c + \alpha_r)(T_0 - T_s) + r\alpha'(X_0 - X_s) + \varepsilon_S(J_d \sin h + J_s) - \varepsilon_L J_{\text{night}} \quad (8.1)$$

ただし, α_c は対流熱伝達率, α_r は放射熱伝達率, α' は水分伝達率, r は蒸発潜熱, ε_S は短波吸収率, ε_L は長波吸収率, J_h は短波放射, J_{night} は夜間放射である. 地表面温度 T_s は, 実際には地表面が草地であることを考えるとどの部分を指すのか曖昧であり複雑な問題を孕んでいるが, ここでは最も簡易な扱いをしている.

ここで, $r\alpha'(X_0 - X_s)$ の項に関しては蒸発比 β を用いて表現し, また, 飽和絶対湿度に関しては線形化し, 飽和絶対湿度の温度に対する変化率を γ とすると,

$$r\alpha'(X_0 - X_s) = r\alpha'\beta(X_0 - X_{\text{sat}}(T_s)) = r\alpha'\beta(X_0 - (X_{\text{sat}}(T_0) + \gamma(T_0 - T_s))) \quad (8.2)$$

γ は, 温度の関数で,

$$\gamma = \frac{dX_{\text{sat}}}{dT} \quad (8.3)$$

となる.

等価気温 SAT(Sol Air Temperature) に蒸発潜熱の効果を加え, 地表面熱伝達率を修正すれば,

$$q = \alpha(T_{\text{SAT}} - T_s) \quad (8.4)$$

と従来の形式で表現できる [99][58]. ただし,

$$T_{\text{SAT}} = T_0 + \frac{\varepsilon_X}{\alpha}(X_0 - X_{\text{sat}}(T_0)) + \frac{\varepsilon_S}{\alpha}(J_d \sin h + J_s) - \frac{\varepsilon_L}{\alpha}J_{\text{night}} \quad (8.5)$$

$$\varepsilon_X = r\alpha'\beta \quad (8.6)$$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r + \gamma\varepsilon_X \quad (8.7)$$

である.

8.4.2 地表面熱伝達率

地表面対流熱伝達率 α_c は, ほぼ風速に比例するが, 年間を通じて一定とした. 一般には, 10 から 16[kcal/m²h°C] 程度の値が用いられる. ここでは, 13[kcal/m²h°C] とした. また, 放射熱伝達率 α_r は 4[kcal/m²h°C] とした.

8.4.3 地表面湿気伝達率

湿気伝達率 α' と対流熱伝達率 α_c には, c_p を空気の比熱として,

$$\alpha' = \frac{\alpha_c}{c_p} \simeq 4\alpha_c \quad (8.8)$$

の関係 (Lewis の関係) が成り立つことが知られているのでこれから 52[g/m²h(g/kg')] とした.

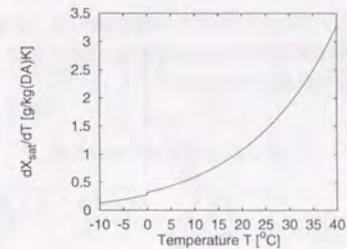


図 8.6 飽和絶対湿度の温度に対する変化率

8.4.4 飽和絶対湿度の温度に対する変化率

飽和絶対湿度の温度に対する変化率 γ は, -10°C から 40°C の間で図 8.6 のように変化するが, 15°C を基準にとって 0.8 で年間一定とした.

8.4.5 蒸発比

草地の蒸発比 β は, 一般に 0.2 から 0.4 程度である. 感度解析の結果 0.3 を採用した.

8.4.5.1 放射吸収係数 ($\varepsilon_S, \varepsilon_L$)

草地のアルベドは, 草の高さなどによって異なり, 0.16-0.26 程度の値をとることが知られている [117]. ここでは短波吸収率 ε_S の値として 0.8 を採用した (アルベド 0.2). また, 長波吸収率 ε_L としては同様に 0.9-0.95 の値をとることが知られており, ここでは 0.9 とした.

8.4.6 地盤物性

実測によって, 熱伝導率 0.53[kcal/mhK], 容積比熱 590[kcal/m³K] の結果が得られているが, 深さ 0.5[m] の部分の 1 回のサンプリングであり, 季節的にも位置的にも実験期間の地盤内すべてを代表しているとは言い難いため, 熱伝導率に関しては, 後述のように実験棟の南 10[m] の地点の地中温度変動より 0.65[kcal/mhK] 決定している.

8.4.7 不易層

スラブ下の温度分布実測値より, 4[m] 程度で温度がほぼ一定であることがわかっているため, 地上から 4[m] 下の位置に常水面があるものとして, この部分を不易層とした. 不易層温度は, 深さ 2.5[m] の部分の 1990 年から 1993 年の平均値 15.7[°C] とした.

8.4.8 地表面熱伝達率・蒸発比・熱伝導率の感度解析

地表面熱伝達率・蒸発比・熱伝導率は, 感度解析を行って決定した. 表 8.11 にパラメータの水準値と, その他の条件をまとめたものを示す. なお, 本計算の前に 2 年間 1990 年の

データで助走させている。図 8.7 にそれぞれを標準条件 (第 2 水準) から変化させた場合の地中温変動を示す。地表面熱伝達率 13[kcal/m²hK]、蒸発比 0.3、熱伝導率 0.65[kcal/mhK] とした標準条件の標準誤差が最も小さかった。

表 8.1 感度解析の設定条件

項目	第 1 水準	第 2 水準	第 3 水準
地表面対流熱伝達率 α_c [kcal/m ² hK]	10	13	16
蒸発比 β [-]	0.2	0.3	0.4
土壌熱伝導率 λ [kcal/mhK]	0.55	0.65	0.75

8.5 シミュレーションモデル

8.5.1 計算方法

計算は、空間領域は 3 次元差分法、時間領域は後退差分法によって離散化して行った。ただし、1 次元壁体に関しては、応答係数法を用いている。

8.5.2 建物モデル

地表面の日影を考慮するため、対称条件は用いずに離散化した。メッシュ分割は、南北方向 41、東西方向 41、上下方向 21 で、壁や地表面近傍は細かく分割している。メッシュ分割の様子を図 8.8 に示す。

8.5.3 壁体仕様

壁体仕様を図 8.9 に示す。物性値は、土壌物性以外はすべて設計値をそのまま用いた (表 8.2)。

8.5.4 その他の設定条件

内部発熱は、実験と同様、年間を通じて、7:00-11:00、13:00-15:00、17:00-2:00 に 560[kW] を間欠で与えた。これは居間の生活パターンを想定したものである。対流と放射の比は 3:7 とした。換気量は常時 3S[m³/h] である。全熱交換器の効率は 50% で年間一定とした。

8.5.5 地表面境界条件

地表面の境界条件としては、建物の地上部分の影響を考え、式 (8.5) を拡張した、

$$T_{SAT} = T_0 + \frac{\epsilon X}{\alpha} (X_0 - X_{sat}(T_0)) + \frac{\epsilon S}{\alpha} (v J_d \sin h + \varphi J_s) - \frac{\epsilon L}{\alpha} \varphi J_{night} \quad (8.9)$$

を用いる。ただし、ここで v は直達日射が当るとき 1、当たらないとき 0 となる関数であり、 φ は天空率である。建物地上部分の反射は考慮せず、また、建物外表面は外気温に等しいも

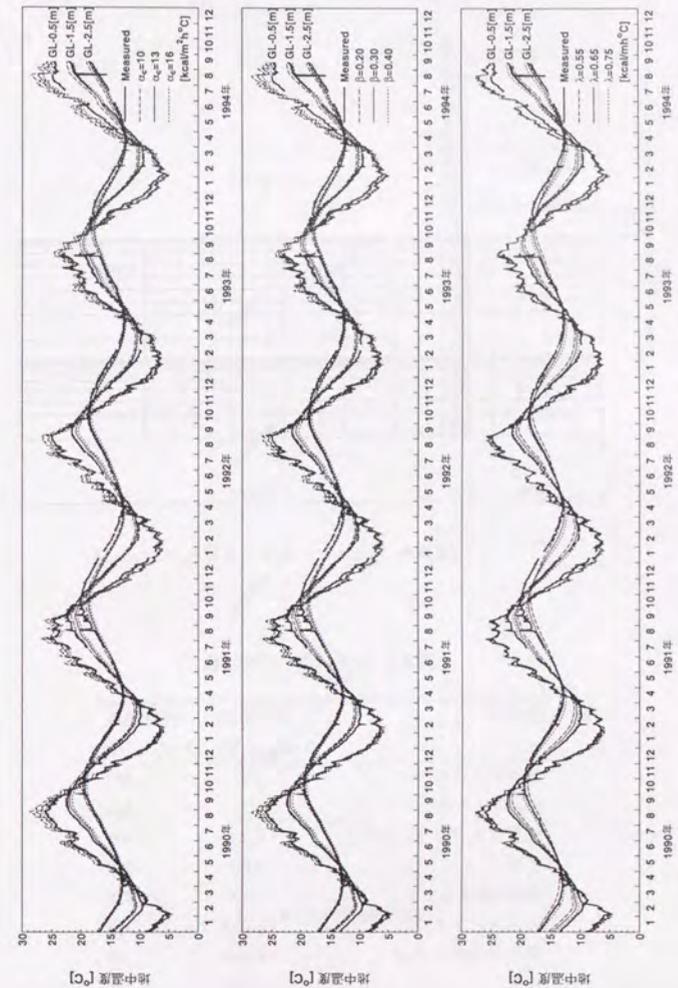


図 8.7 表面熱伝達率・蒸発比・熱伝導率の感度解析

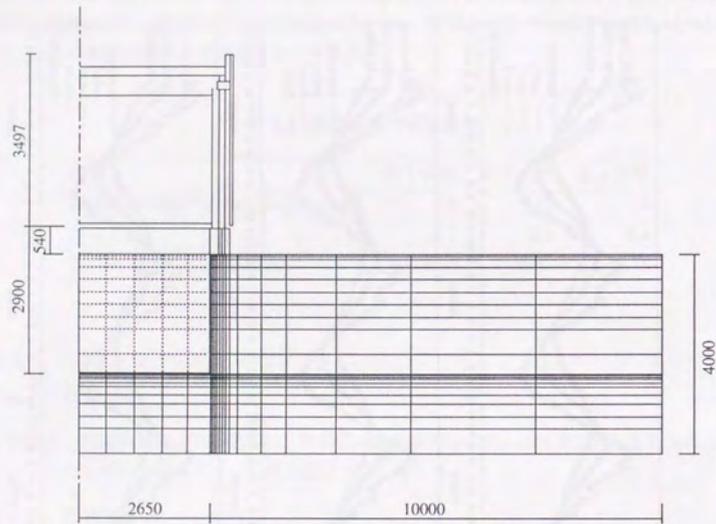


図 8.8 シミュレーションモデル

表 8.2 計算に用いた物性値

材料	熱伝導率 [kcal/mhK]	容積比熱 [kcal/m ³ K]
普通コンクリート	1.2	462
PC コンクリート	1.3	456
軽量コンクリートパネル	0.22	205
土壌	0.65	590
砂利 (割栗石)	0.53	370
エスレンフォーム	0.032	13
硬質ポリウレタン	0.024	11
合板	0.16	171
軽量ブロック	0.46	375
モルタル	1.3	380

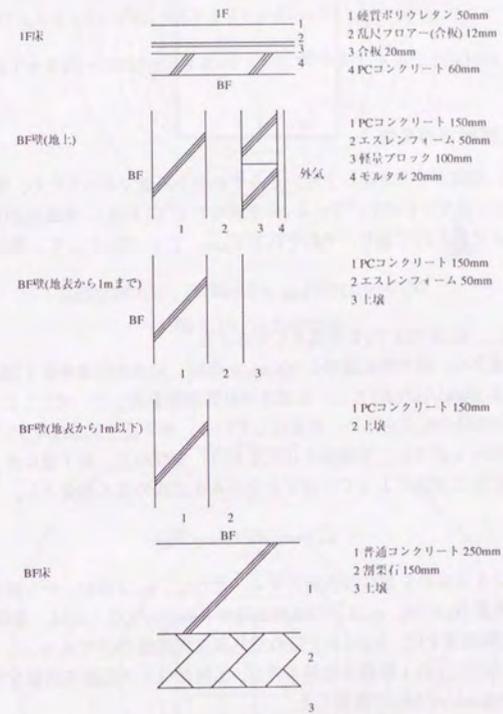


図 8.9 実験棟壁体構成

のと仮定したことに相当している。建物の平面は外寸6.2[m]×6.2[m]とし、高さが4.04[m]の直方体と考えて、また隣棟は十分離れているのでその影響は無視して、日影判定、天空率の計算を簡略化している。実験棟周囲の天空率分布を図8.10に、また、1993年の年積算水平面全天日射の分布を図8.11に示す。水平面全天日射を e_{S}/α 倍したものが等価温度上昇となる。 α は、

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r + \gamma r \alpha' \beta = 13 + 4.5 + 0.8 \times 0.6 \times 52 \times 0.3 = 24.5 \quad (8.10)$$

であるので、500[Mcal/m²a]で年平均 $500 \times 1000 \times 0.8/8760 \times 24.5 = 1.8[^\circ\text{C}]$ 程度の温度差となる。

8.5.6 地下室側境界条件

実測室温は、空調が上吹き出し上吸い込みでかつ小風量であったため、特に空調時には2月で5[°C]の上下温度分布が生じている(非空調時で2[°C]程度)。室温測定は、床上0.05[m]、1.2[m]、2.5[m]で行われており、それぞれを $T_{0.05}$ 、 $T_{1.2}$ 、 $T_{2.5}$ として、平均室温 T_R を、

$$T_R = 0.2159T_{0.05} + 0.4008T_{1.2} + 0.3833T_{2.5} \quad (8.11)$$

によって算出し、計算では T_R を室温として与えた。

室内側熱伝達率は、総合熱伝達率を8[kcal/m²hK]、対流熱伝達率を3.5[kcal/m²hK]、放射熱伝達率を4.5[kcal/m²hK]とし、全部で計算期間を通じて一定とした。相互放射は第7章で説明した松尾の仮定を用い、簡易化している。地下室空気温度 T_R を与え、空気温度に対する空調負荷を計算し、実測値と比較を行う。すなわち、地下室に流入する熱量については、室の空気に対流によって伝達する分のみを正味の流入熱量とし、

$$q_{ci} = \alpha_c A_i (T_{Wi} - T_R) \quad (8.12)$$

によって求められるものを部位の負荷とする。ただし、 q_{ci} は部位 i から単位時間当りに室空気に伝わる熱量[kcal/h]、 α_c は、対流熱伝達率[kcal/m²hK]、 A_i は、部位 i の面積[m²]、 T_{Wi} 部位 i の表面温度[°C]、 T_R は地下室の空気温度実測値[°C]である。

1階床(地下室天井)の1階側の境界条件は、1階グローブ温度実測値を等価気温とみて総合熱伝達率8[kcal/m²hK]で計算した。

8.6 計算結果

8.6.1 地中温度分布

地下室の影響によって、周辺土壌は更地とは異なった温度分布が生じる。地下室からの距離による地中温度変化を図8.12-図8.14に示す。冬期における例として、1993年2月15日18時をみている(図8.12)と、実測値では北方向のほうが南方向よりGL-0.5[m]で3-4[°C]近く低い値になっている。他の方位は測定ポイントが少なく確たることはいえないが、実

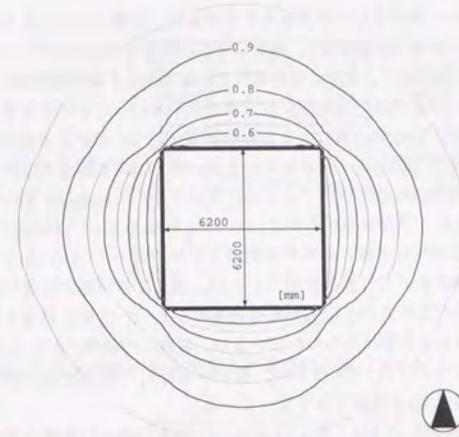


図8.10 天空率分布

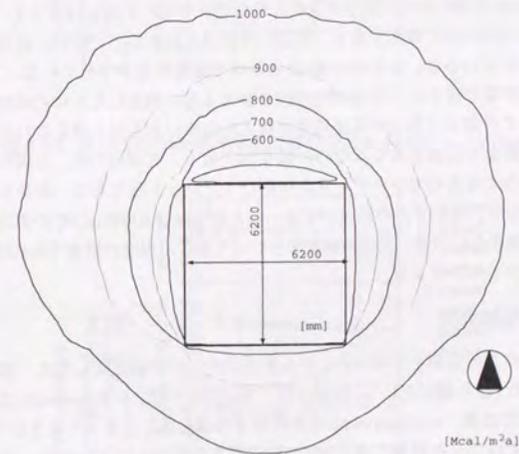


図8.11 年積算水平面全天日射分布(1993年)

際上南方位と同一とみてさしかえなさそうである。計算によっても北方向は他の方向と比べてGL-0.5[m]で2[°C]程度低く、確かに日影の影響はあらわれているが、北方向以外は実測値より2[°C]程度低く、実際には計算以上に地下室による影響範囲は広い。温度分布から判断するに地中部断熱材の熱抵抗が設計値より小さかったものと推察される。冬期は太陽高度が低いため、4[m]以上離れても日影の影響が続くことが計算結果からわかる。地下室床下の温度分布は比較的よく照合しているが、地下室床表面温度は計算値のほうがやや高い。これは、実際には地下室で上下温度分布が生じているのを平均化して与えているためであろう。次に、夏期における例として1993年8月15日18時をみてみる(図8.14)。一般的に冬期とは逆に計算値のほうが実測値よりやや高い。GL-2.5[m]、壁から0.5[m]で西方位測定値の値が高いのは原因不明であるが、測定上の問題である可能性が高い。実測では北方向の温度が他の方向と比べてどの深さでも1, 2[°C]低い結果となっているが、計算ではほとんど日影の影響はあらわれていない。最後に中間期における例として1993年5月15日18時をとりあげた。GL-2.5[m]、壁から0.5[m]で西方位測定値の値が夏期と同様高い。日影の影響は2[m]程度でなくなっている。

図8.15-図8.17に示したのは、図8.12-図8.14と同じ日時の計算値の等温線図である。今回の計算では壁から10[m]位置で境界条件を与えているが、この図をみる限り計算領域として5[m]程度考えておけば十分である。冬期・夏期とも地表面付近の断熱材の効果は大きく、現在の1[m]は最低必要であるように思われる。

8.6.2 日積算空調負荷

1993年の実測空調負荷と計算空調負荷とを比較したものを図8.19に示す。実測では、冬期暖房負荷は5[Mcal/d]程度であり、夏期に冷房負荷は生じていない。計算でもほぼこの傾向は押えられているが、9月から10月にかけて冷房負荷が生じている。これは8月27日頃に台風の影響で浸水してしまったため9月1日に排水したものの床壁は濡れたままであったためその蒸発潜熱分の冷房負荷が捉えられているものと考えられる。

実測値と計算値の相関をみてみたのが図8.20である。欠測日の他、欠測日の直後1日も計算誤差が大きくなるので予めデータから除いてプロットしてある。かなりばらついているようにみえるが、もともとの負荷が小さいことからほぼ±1[Mcal/d]の誤差でありこれは50[W]程度に過ぎないので、実測の精度からいってもこの程度の誤差であれば、よくシミュレートできているといえよう。

8.6.3 部位別熱負荷

図8.21に月積算熱負荷をプロットしたものを示す。計算値に関しては、部位別の月積算熱負荷を示した(流入側が正)。wall(top)は、地上部分の壁、wall(middle)は断熱材のある1[m]の深さまでの壁、wall(bottom)はそれ以下の壁を指し、すべて各方位の合計である。地中温度分布では2月の計算で北と南で2[°C]程度の差が生じていたが、負荷ではごく僅かの差しか生じないため各方位の合計のみをプロットした。地下室部分の壁では、かなりの位相遅れがあり、夏期には室温が高いせいもあるが年間にわたって損熱失側となっている。

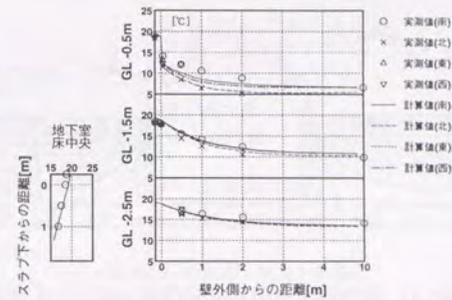


図8.12 地中温度分布:実測値と計算値の比較(1993-02-15 18:00)

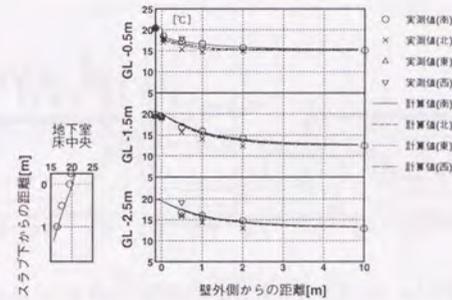


図8.13 地中温度分布:実測値と計算値の比較(1993-05-15 18:00)

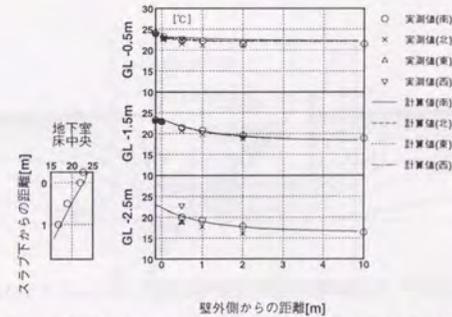


図8.14 地中温度分布:実測値と計算値の比較(1993-08-15 18:00)

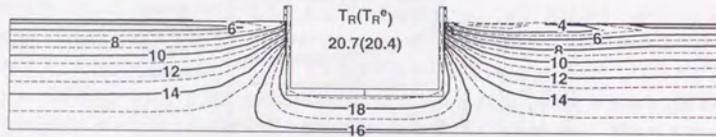


図 8.15 地中温度分布:計算値等温線図 (1993-02-15 18:00)

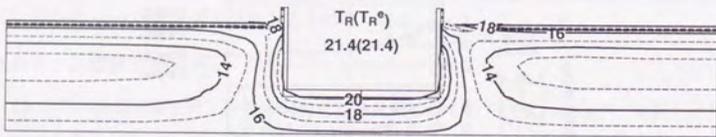


図 8.16 地中温度分布:計算値等温線図 (1993-05-15 18:00)

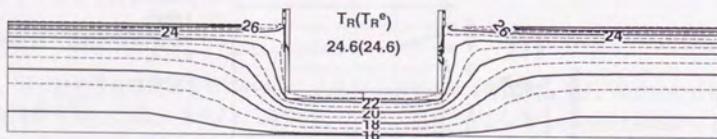


図 8.17 地中温度分布:計算値等温線図 (1993-08-15 18:00)

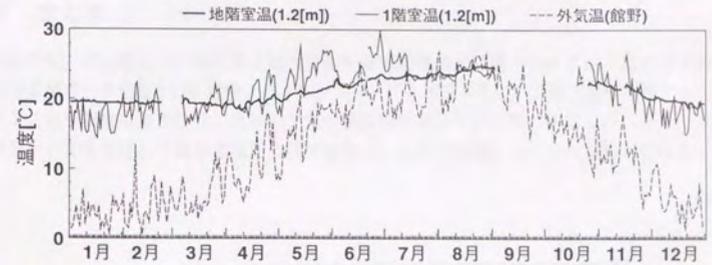


図 8.18 外気温・室温の年変動

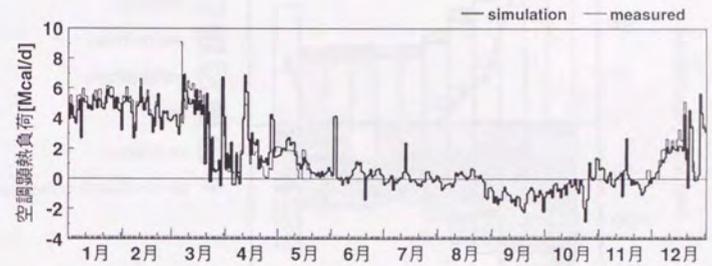


図 8.19 日積算負荷の年変動

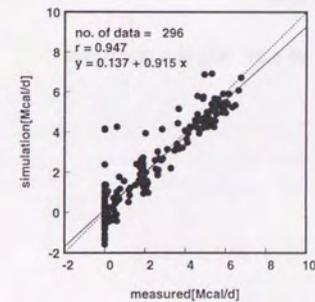


図 8.20 日積算負荷の実測値と計算値の比較

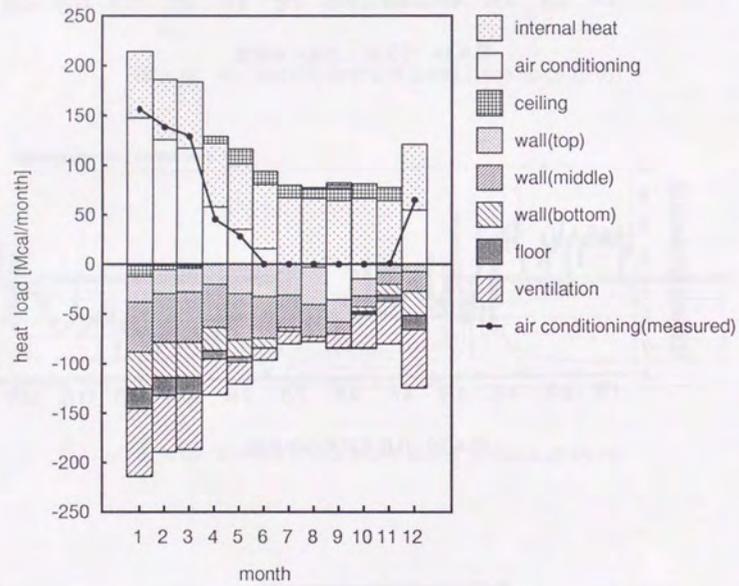
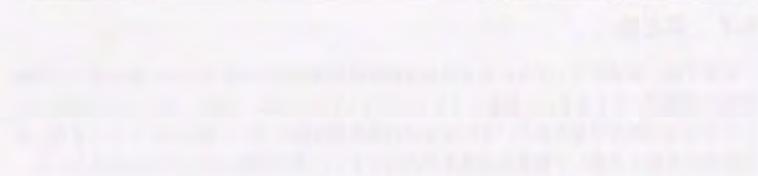


図 8.21 部位別月積算熱負荷

8.7 まとめ

本章では、茨城県つくば市にある建設省建築研究所敷地内に建てられた地下室つき実験住宅の実測データをもとに、数値シミュレーションによる検討を行い、地下室が存在することによる地中温度分布の変化、及び地下室の熱負荷性状について明らかにした。また、水分蒸発や日影も考慮して地表面境界条件の設定をし、その影響についての検討も行った。

図 2.10 地下室つき住宅の断面図



総括

本論文は、地盤に接する壁体や熱橋のように熱流の多次元性を考慮しなければならない場合について熱負荷計算法の拡張を行ったものである。熱負荷計算の観点からみれば、表面境界温度と熱流の関係のみが得られていればよいことから、伝熱系を表面温度を入力、表面熱流を出力とみた多入力多出力システムとみなし、伝達関数近似に関する検討を主に行った。また、熱と水分が連成するような場合にも壁体の応答や室の顕潜熱負荷・温湿度予測手法の開発を行った。

以下、本研究によって得られた成果を簡単に振り返り、総括とする。

第2章では、多次元熱伝導問題を両表面温度もしくは境界流体温度を入力、表面熱流を出力とみた多入力多出力システムとみなし、システム理論の観点から、差分法・有限要素法・境界要素法による離散化、システムの低次元化・応答近似、システム合成に到るまでを統一的に論じた。熱負荷計算すなわち壁体の熱応答特性把握という観点からみれば、システムの内部表現はあまり重要ではなく、地盤内部の温度を逐次計算していくような手法をとらなくても、伝達関数を直接もとめて応答近似を行うことによってシステムを簡易に表現できることを示した。

第3章では、地盤に接する壁体の熱応答を算出する方法として、境界要素法によって伝達関数を求め、それを数値 Laplace 逆変換する方法について検討した。手法自体は、境界要素法の最初期から存在するものであるが、時間領域で畳み込み演算を行う場合に効率化が図れることから、その有用性を主張した。境界要素法は無限・半無限領域の問題を高精度に計算できることが利点の一つとしてあげられるが、地表面や地中部分を離散化せずに地下壁面のみを離散化して解く手法及び地下壁近傍の非等質媒体を直接離散化せず解析的な手法を併用して要素数を増さずに解く手法の2つを新たに提案し、十分な精度で計算で

きることを示した。また、地盤に接する壁体のような熱的に非常に厚い壁体でも従来の応答係数法が適用できることを示した。

第4章では、地盤に接する壁体熱損失の簡易計算法について今までの研究状況を振り返ったのち、土間床、地下室の定常伝熱問題に対する解析解について考察した。Green関数を用いる方法と Schwarz-Christoffel変換による等角写像法を併用して Dirichlet境界条件における表面熱流を解析的に算出し、更に地盤以外の熱抵抗が存在する Robin境界条件に関しては、Dirichlet境界条件の場合と熱の流れる経路(heat flow path)が同じであると仮定して地盤以外の熱抵抗を直列接続して単純化する方法を適用して、2次元解析解とした。続いて、動的熱負荷計算に用いることを目的として、伝達関数の近似式を作成し、地盤に接する壁体の非定常熱流の簡易計算法とした。従来簡易計算法というと熱損失係数など定常特性だけに終始していた感が強いが、地下空間のように周囲に大きな熱容量を持っている空間を対象とした熱負荷計算では定常特性のみの把握では大きな誤差が生じる。また、簡易計算といえども計算機の普及によって手計算の範囲に拘る必要もなくなっている。その意味で、本論文で作成した簡易式は実用的なものである。

第5章では、熱橋の熱応答近似について考察した。地盤に接する壁体と同様、伝達関数近似の観点から、熱橋の非定常熱応答特性について検討し、既にデータベース化されている熱橋の熱貫流率補正に用いる係数だけを利用して、熱貫流応答、吸熱応答とも十分な精度で推定できる簡易式を作成した。

第6章では、線形熱水分同時移動系に対して、第5章までと同様に正の Laplace変換領域における伝達関数を離散的に求め、それらに局所的な適合条件を課して有理多項式近似し時間領域の応答を求める手法(固定公比法)を適用し、多層平面壁に対して熱単独の場合と同程度の手間で高精度に熱水分同時移動系の応答を算出することが可能であることを示した。

第7章では、多次元形態及び熱水分同時移動を考慮した熱負荷計算法について述べた。第6章まででは壁体の熱水分応答について論じているものの、建築空間に壁体が置かれたときに生じる壁体表面からの対流による空気への熱伝達や壁体相互の放射熱伝達については全く触れていない。新たに室温と室供給熱量を境界条件としてシステムを記述しなおし、室内温湿度・顕潜熱負荷計算法とした。特に、壁体の相互放射を考慮した場合の簡易化について詳述した。また、湿度が成行きの場合の空調システムとの連成の例として、単一ダクト CAV方式の場合を取り上げ、コイル状態や軽負荷・過負荷時など空調状態の変化を考慮した計算式を具体的に示した。

第8章では、茨城県つくば市にある建設省建築研究所敷地内に建てられた地下室つき実験住宅の実測データをもとに、数値シミュレーションによる検討を行い、地下室が存在することによる地中温度分布の変化、及び地下室の熱負荷性状について明らかにした。また、水分蒸発や日影も考慮して地表面境界条件の設定をし、その影響についての検討も行った。

本論文は、熱負荷計算に焦点を絞って記述しているため、地下室の熱環境を考える場合に最も問題になる結露については全く扱わなかった。また、現実にも多いドライエリアつき地下室についても述べることができなかった。これらについては、既報 [106][93] で若干の

検討は行っているものの今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 赤坂 裕: 床面および地下壁面の暖房負荷計算法, 空気調和・衛生工学会論文集, No.7, 1978.
- [2] 赤坂・伊丹・小原: 熱橋の計算法, 日本建築学会熱シンポジウム, 20, 71-86, 1990.
- [3] 赤坂・二宮・小原: 金属熱橋を有する壁体の熱貫流率の設計計算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), 875-876, 1991.
- [4] 赤坂 裕: 熱橋を有する壁体及び土間床の熱貫流率の計算法と計算例, IBEC, 68, 28-40, 1992.
- [5] 赤司・松尾・井上・永田: ドライエリア付き地下居室に関する温熱環境の考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), 735-736, 1990.
- [6] Akridge, J.M. and Poulos, J.F.: The decremented average ground-temperature method for predicting the thermal performance of underground walls, ASHRAE Trans., 89, Part 2A, 49-60, 1983.
- [7] Aoki, M.: Control of Large-Scale Dynamic System by Aggregation, IEEE Trans. Autom. Control, AC-13-3, 246-253, 1968.
- [8] 荒谷: 逐次積分法の応用その5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1974.
- [9] ASHRAE: ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1993.
- [10] Beck, J.V. et al.: Heat Conduction Using Green's Functions, Hemisphere, 1992.
- [11] Boileau, G.G. and Latta, J.K.: Calculation of basement heat losses, National Research Council of Canada, Division of Building Research Report N.R.C. 10477, Dec., 1968.
- [12] Brebbia, C.A., Telles, J.C.F., Wrobel, L.C.: Boundary Element Techniques, Springer-

- Verlag, Berlin, Heidelberg, 1984. (田中正隆訳: 境界要素解析, 丸善, 1984.)
- [13] Burch, D.M., J.E. Seem, G.N. Walton, and B.A. Licitra: Dynamic evaluation of thermal bridged in a typical office building, ASHRAE Trans. 98(1), 291-304, 1992.
- [14] Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C.: Conduction of heat in solids (2nd ed.), Oxford University Press, 1959.
- [15] Chidanbara, M.R. and Davison, E.J.: Correspondence on a Method for Simplifying Linear Dynamic Systems, IEEE Trans. Autom. Control, AC-12, 119-121, 1967.
- [16] Christian, J.E. and Strzepek, W.R.: Procedure for determining the optimal foundation insulation levels for new, low-rise residential buildings, ASHRAE Trans., 93, Part 1, 909-938, 1987.
- [17] Cost, T.L.: Approximate Laplace Transform Inversions in Viscoelastic Stress Analysis, AIAA J. Vol.2, 2157-2166, 1964.
- [18] Delsante, A.E., Stokes, A.N. and Walsh, P.J.: Application of Fourier transforms to periodic heat flow into the ground under a building, Int. J. Heat Mass Transfer, 26, 121-132, 1983.
- [19] 土壌物理研究会編: 土の物理学, 森北出版, 1979.
- [20] 永村一雄: 熱的作用からみた建物躯体・人体生理心理の諸特性, 博士論文, 1988.
- [21] 遠藤清尊: 逐次積分法を用いた地中建物熱負荷解析に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 587-588, 1983.
- [22] 榎園正人, 境界要素解析, 培風館, 1986.
- [23] Faddeev, D.K. and Faddeeva, V.N.: Computational Methods of Linear Algebra, W.H. Freeman and Co., 1963.
- [24] Fairey, P.W. and Kerestecioglu, A.A.: Dynamic modeling of combined thermal and moisture transport in buildings: Effects on cooling loads and space condition, ASHRAE Trans., Vol.91, Part 2A, 461-472, 1985.
- [25] Finlayson, B.A.: The Method of Weighted Residuals and Variational Principles, Academic Press, 1972. (鷲津久一郎他訳: 重みつき残差法と変分原理, 培風館, 1974.)
- [26] 藤田・黒田・伊藤: 関数解析, 岩波書店, 1991.
- [27] Gallagher, R.H. and Mallett, R.H.: Efficient Solution Process for Finite Element Analysis of Transient Heat Conduction, Bell Aero Systems, Buffalo, 1969.
- [28] Guyan, R.J.: Reduction of Stiffness and Mass Matrices, AIAA J., 3-2, 380, 1965.
- [29] Hansteen, O.E. and Bell, K.: On the Accuracy of Mode Superposition Analysis in Structural Dynamics, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 7, 405, 1979.
- [30] 長谷川房雄ら: 多数室の温湿度解析その1~その6, 日本建築学会東北支部論文報告集, 1983-1985.
- [31] 長谷川・吉野・松本: 半地下試験家屋における透過日射を阻止した状態での熱環境性能に関する長期実測, 日本建築学会計画系論文報告集, 1987.

- [32] Hayami, K.: A Robust Numerical Integration Method for Three-Dimensional Boundary Elements Analysis, Proc. 12th Int. Conf. Boundary Elements in Engineering, (Boundary Elements XII 1), 1990.
- [33] 細野敏夫: 数値ラプラス変換, 電気学会論文誌 A, vol.99, 493, 1979.
- [34] 今村勤: 物理とグリーン関数, 岩波書店, 1978.
- [35] 今村勤: 物理と行列, 岩波書店, 1994.
- [36] 井上・松尾・本間・小木: 地下居室の熱的特性に関する研究(2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 961-962, 1985.
- [37] 井上・松尾・佐藤: 地下居室の熱的特性に関する研究(3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 885-886, 1986.
- [38] 井上・松尾: 地下居室の蓄熱負荷に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 305-308, 1986.
- [39] ISO/TC 163/SC 2 N244: Thermal performance of buildings - heat transfer via the ground - Calculation method, 1995.
- [40] ISO/TC 163/SC 2: ISO/DIS 10211. Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - General calculation methods, 36-38, 1992.
- [41] 石田建一: 住宅用熱負荷シミュレーション手法に関する研究, 博士論文, 1987.
- [42] 石田・宇田川・持田: 壁体の吸放湿を考慮した室温湿度・熱負荷計算法その1, その2, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 445-452, 1989.
- [43] 石田他: 地下室設計マニュアル用資料の作成, 建築研究振興協会, 1991.
- [44] 岩井・中村他: 住宅用地下室環境の性能評価法(3)(5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987, 1988.
- [45] 岩堀長慶編: 線形代数, 裳華房, 1982.
- [46] 計測自動制御学会編: 自動制御ハンドブック(基礎編), オーム社, 1983.
- [47] 加川幸雄: 開領域問題のための有限/境界要素法, サイエンス社, 1983.
- [48] 金子・宮田・藤井他: 大規模地下発電所の空調・換気計画の研究(その2)-(その6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1982-1985.
- [49] 片山徹: システム同定入門, 朝倉書店, 1994.
- [50] 川下研介: 熱伝導論, 河出書房, 1941.
- [51] 建設省住宅局住宅生産課監修: 住宅の新省エネルギー基準と指針, 住宅・建築省エネルギー機構, 1992.
- [52] 建設省住宅局住宅生産課, 建設省住宅局建築指導課 監修: 良好な住宅の地下室の設計・施工指針, 日本建築センター, 1994.
- [53] 金成完: 建物の非定常潜熱負荷・湿度変動に関する研究, 博士論文, 1988.
- [54] 金・松尾: 熱湿気同時移動方程式による非定常潜熱負荷計算法に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 441-444, 1989.
- [55] Kokotovic, P.V., O'Malley, J.R., R.E. and Sannuti, P.: Singular Perturbations and Order Reduction in Control Theory - An Overview, Automatica, 12, 123-132, 1976.

- [56] 紺野・荒谷: 指数を指定した熱流の過渡応答近似法による非定常解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 701-702, 1982.
- [57] 近藤政市: 不連続部分を有する導体(例えば内燃機ピストン)に於ける伝熱問題の一解法, 機械学会誌, 34, 852-870, 1931.
- [58] 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 134, 1994.
- [59] Krarti, M. and Claridge, D.E.: Analytical calculation procedure for underground heat losses, ASHRAE Trans., 94, Part 2, 1003-1019, 1988.
- [60] Krarti, M., Kreider, J.F. and Claridge, D.E.: Schwarz-Christoffel transformation applied to steady-state ground-coupling problems, Energy and Buildings, 20, 193-203, 1994.
- [61] 窪田・石戸谷: 地中住居の一熱解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1983.
- [62] 栗岡・石田・藤井: 自然通気を考慮した地下利用施設の温湿度予測手法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985.
- [63] MacDonald, G.R., Claridge, D.E. and Oatman, P.A.: A comparison of seven basement heat loss calculation methods suitable for Variable-Base Degree-Day calculations, ASHRAE Trans., 91, Part 1B, 916-933, 1985.
- [64] 前田 敏男: 建物下地盤の温度及び熱流に関する研究(1), 日本建築学会研究報告, 18, 215-216, 1952.
- [65] 松本衛: 建築壁体における熱水分の同時移動及び水分蓄積に関する研究, 博士論文, 1978.
- [66] 松本・近藤: 線形熱水分移動特性を表す多層壁遷移行列の解式とその特性(その1)漸化表現による遷移行列の解式, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 101-104, 1982.
- [67] 松本・近藤・飯塚: 線形熱水分移動特性を表す多層壁遷移行列の解式とその特性(その2)アドミッタンス行列の計算法及び二層壁の吸放湿特性, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 105-108, 1982.
- [68] 松本・近藤・井谷・芝池: ハイグロスコピック領域内の多層壁体及び室の周期的定常解とその特性, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 121-124, 1983.
- [69] 松本・近藤・井谷・芝池: 吸放湿を有する多層壁体および室の周期定常解とその性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 697-698, 1983.
- [70] 松本衛: 新建築学体系10「環境物理」3. 湿気, 彰国社, 1984.
- [71] 松本・石田: 壁体の吸放湿過程の非定常解—単層壁の固有値の性質と解の特徴—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 891-892, 1985.
- [72] 松本衛: 室の吸放湿性を考慮した室温湿度変動および熱・水分負荷の解析, 空気調和・衛生工学, 62, 867-877, 1988.
- [73] 松本・長友・吉野: 熱損失係数計算に用いる地下室壁体の実質熱貫流率算定式の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 25-28, 1992.
- [74] 松浦・中尾・宮脇: 壁体の吸放湿を考慮した応答係数, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 121-124, 1976.

- [75] 松尾陽: 大量・迅速処理を目的とした畳演算の近似算法, 建築学会関東支部第41回学術研究発表会, 81-84, 1970.
- [76] 松尾陽: 建物伝熱の近似解法とその応用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 133-134, 1971.
- [77] 松尾・鎌田・田中・栗田: 地中建築の熱的性能に関する研究(1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 509-510, 1979.
- [78] 松尾陽他: 空調設備の動的熱負荷計算入門, 建築設備技術者協会, 1980.
- [79] 松尾・鎌田・田中・栗田: 地中建築の熱的性能に関する研究(2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 517-518, 1980.
- [80] 松尾・鎌田・栗田・本岡: 地中建築の熱的性能に関する研究(3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 625-626, 1981.
- [81] 松尾・鎌田・栗田・本岡: 地中建築の熱的性能に関する研究(4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 625-626, 1981.
- [82] 松尾陽: 伝達関数値逆変換の一解法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 513-514, 1983.
- [83] 松尾・井上・本間: 居住空間としての地下室の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 585-586, 1983.
- [84] 松尾陽: 線形熱・湿気方程式の精解法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 775-776, 1984.
- [85] 松尾・井上・本間: 居住空間としての地下室の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 777-778, 1984.
- [86] 松尾 陽: HASP/ACLD/8501 解説, 日本建築設備士協会, 1985.
- [87] 松尾陽: 空調負荷計算におけるふく射熱の取扱い, 空気調和・衛生工学, 59-4, 323-329, 1985.
- [88] 松尾陽: 室の潜熱容量について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 815-816, 1987.
- [89] 松尾・井上・永田: 地下居室の熱的特性に関する研究(4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 867-868, 1987.
- [90] 松尾・井上・永田: 地下居室の熱的特性に関する研究(5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 607-608, 1988.
- [91] 松尾・永田: 吸放湿を考慮した熱負荷計算法, 日本建築学会熱シンポジウム, 21, 55-64, 1991.
- [92] 松尾・大沢・坂本他: 住宅用地下室の温熱環境と空調・換気システムに関する研究 その1, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 249-252, 1990.
- [93] 松尾・井上・永田・赤司: ドライエリア付き地下居室の室温及び湿度に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 705-798, 1990.
- [94] 松浦・中尾・宮脇: 壁体の吸放湿を考慮した応答係数, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 121-124, 1976.
- [95] Mitalas, G.P.: Calculation of basement heat loss, ASHRAE Trans., 89, Part 1B, 420-

- 437, 1983.
- [96] Mitalas, G.P.: Calculation of below-grade residential heat loss: low-rise residential building, ASHRAE Trans., 93, Part 1, 743-783, 1987.
- [97] 持田・宇田川: 壁体吸放湿を考慮した冷房時室内温湿度, 熱負荷シミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 693-696, 1990.
- [98] 森 正武: FORTRAN77 数値計算プログラミング, 岩波書店, 1986.
- [99] 松本・森山他: 蒸発を有する地面の表面温度について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 473-474, 1981.
- [100] 村田健郎・名取亮・唐木幸比古: 大型数値シミュレーション, 岩波書店, 1990.
- [101] 長松・大熊: 部分構造合成法, 培風館, 1991.
- [102] 長野・落藤・西片: 凍結・融解による土壌の熱伝導率の変化と熱伝導モデル, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 5-8, 1992.
- [103] 中尾正喜: 熱・湿気同時移動方程式の差分について 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 755-756, 1982.
- [104] 中尾・大島: 熱・湿気同時移動方程式の差分について 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 757-758, 1982.
- [105] 中尾正喜: 熱・湿気同時移動方程式の差分について 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 689-690, 1983.
- [106] 長井・松尾・井上・永田: 地下室の結露に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1405-1406, 1989.
- [107] 永田・松尾・井上: 地下室の熱特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 779-780, 1989.
- [108] 永田・松尾: 半無限体の熱特性近似に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 735-737, 1990.
- [109] 永田・松尾: 熱水分同時移動を考慮した壁体応答解析 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), 765-766, 1991.
- [110] 永田・松尾・坂本他: 住宅地下室の温熱環境制御技術 その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), 1413-1414, 1992.
- [111] 永田・松尾: 地盤に接する壁体の熱応答の簡易計算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), 1413-1414, 1993.
- [112] 永田・松尾・大澤: 大規模地下空間の熱湿気環境予測プログラムの開発, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 I, 189-192, 1993.
- [113] 永田・松尾: 熱橋の熱応答近似に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D.II), 77-78, 1995.
- [114] 中島・大橋他: 土壌の熱物性値の経時変化に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 441-444, 1986.
- [115] 落藤・横山・山村・金: 垂直埋設管方式の土壌採熱解析への境界要素法の応用, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1988.

- [116] 大坪英臣・久保田晃弘: 相関問題, 培風館, 1991.
- [117] Oke, T.R.: boundary Layer climates (2nd ed.), Methuen&Co., 1987.
- [118] 奥山・木村: 建築物の熱回路系における推移行列と射影分解による時間数値積分公式, 日本建築学会論文報告集, vol.269, 1978.7, p.127, 1978.
- [119] Patankar, S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, 1980. (水谷・香月訳: コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, 1985.)
- [120] Rizzo, F.J. and Shippy, D.J.: A Method of Solution for Certain Problems of Transient Heat Conduction, AIAA J. Vol.8, 2004-2009, 1970.
- [121] 坂本 雄三: 省エネルギー住宅システムの開発報告書第 4 章, 建設省, 1982.
- [122] 佐藤・坂口・伊藤: 地中コンクリート内における水分移動に関する基礎実験, 土木学会第 44 回年次学術講演会 III, 1082-1083, 1989.
- [123] 佐藤・伊藤・坂口: 地下空間におけるコンクリート壁内の水分移動に関する基礎研究, 土木学会第 45 回年次学術講演会 III, 814-815, 1990.
- [124] 佐藤・平井・伊藤: 地下空間利用における壁体内の水分挙動に関する基礎的研究, 土木学会地下空間利用シンポジウム, 133-138, 1990.
- [125] Schapery, R.A.: Approximate Methods of Transform Inversion for Viscoelastic Stress Analysis, Proc. of the Fourth U.S. National Congress on Applied Mechanics, Vol.2, 1075-1085, 1962.
- [126] 芝池・松本: 1 次元熱水分同時移動問題の境界要素法, 日本建築学会計画系論文報告集, 1986.
- [127] 芝池・松本: 熱・水分同時移動系の積分方程式による解析 (その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987.
- [128] 芝池・松本: 多次元複合壁体の最適断熱材貼付法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988.
- [129] 芝池 英樹: 多次元問題の境界要素解析, 日本建築学会熱シンポジウム, 21, 39-46, 1991.
- [130] 芝池 英樹: 熱橋部の周期的熱・湿気特性に関する 2 次元境界要素解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), 269-270, 1994.
- [131] 下田・水野・内藤他: 地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション (2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988.
- [132] Shipp, P.H.: Basement, crawl space, and slab-on-grade thermal performance, ASHRAE SP 38 Thermal performance of the exterior envelopes of buildings II, ASHRAE, 1983.
- [133] 宿谷・斉藤: 熱・湿気容量質点系モデルを用いた室内温湿度の簡易シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 921-922, 1987.
- [134] Smith, G.D.: Numerical Solution of Partial Differential Equations, The Clarendon Press Oxford, 1965. (藤川洋一郎訳: 電算機による偏微分方程式の解法, サイエンス社, 1971.)
- [135] Sobotka, P., Yoshino, H., and Matsumoto, S.: Thermal performance of three deep

- basements, Energy and Buildings, 21, 23-34, 1994.
- [136] Stephenson, D.G. and Mitalas, G.P.: Cooling Load Calculations by Thermal Response Factor Method, ASHRAE Trans., 73-I, III.1-III.1.7, 1967.
- [137] 須田信英: 線形システム理論, 朝倉書店, 1993.
- [138] Swinton, M.C. and Plattes, R.E.: Engineering method for estimation annual basement heat loss and insulation performance, ASHRAE Trans., 87, Part 2, 343-359, 1981.
- [139] 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会: 太陽エネルギー利用ハンドブック, 日本太陽エネルギー学会, p.936, 1985.
- [140] 高浪・松尾・井上他: 地下居室の熱的特性に関する研究 (1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 959-960, 1985.
- [141] 高橋亮一・棚町芳弘: 差分法, 培風館, 1991.
- [142] 田村坦之編: 大規模システム, 昭晃堂, 1986.
- [143] 田辺・中村: 偏微分方程式と境界値問題, 東京大学出版会, 1981.
- [144] 田中正隆・松本敏郎・中村正行: 境界要素法, 培風館, 1991.
- [145] 寺井 俊夫: 地盤の内部温度を計算せずに表面熱流を求める方法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 223-224, 1970.
- [146] 寺井・伊丹: 2層壁で囲まれた土間床の地盤伝熱の計算法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989.
- [147] 寺沢寛一編: 自然科学者のための数学概論 (応用編), 岩波書店, 1960.
- [148] Thompson, J.F. et al.: Numerical Grid Generation, North-Holland, 1985. (小国力・河村哲也訳, 数値格子生成の基礎と応用, 丸善, 1994.)
- [149] 浦野・渡辺・林・龍: 地中熱利用住居の防暑防寒効果に関する数値シミュレーション, 日本建築学会計画系論文報告集, 1988.
- [150] Utamura, M. and Koizumi, M.: Development of Computer Program for Analyzing Three-Dimensional Pressure Field in Pressure Suppression System, J.Nucl. Sci. Tech., 22, 733-741, 1985.
- [151] Walton, G.N.: Estimating 3-D heat loss from rectangular basements and slabs using 2-D calculations, ASHRAE Trans., 93, Part 1, 791-797, 1987.
- [152] 渡辺俊行: 室温変動系の理論構成と動的挙動に関する研究, 博士論文, 1982.
- [153] Wong, S.P.W.: Simulation of simultaneous heat and moisture transfer by using the finite difference method and verified tests in a test chamber, ASHRAE Trans., Vol.96, Part 1, 472-486, 1990.
- [154] Wrobel, L.C. and Brebbia, C.A.: Boundary Element Methods in Heat Transfer, Elsevier, 1992.
- [155] 山内二郎・宇野利雄・一松信 編: 電子計算機のための数値計算法 III, 培風館, 1972.
- [156] 八乙女・松尾・射場本他: 大規模地下構造物の熱負荷計算法に関する研究 (その1), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1989.

- [157] Yard, D.C., Morton-Gibson, M. and Mitchell J.W.: Simplified dimensionless relations for heat loss from basement, ASHRAE Trans., 90, Part 1B, 633-643, 1984.
- [158] 安江: 地盤内における熱挙動の解析 (第1報), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1984.
- [159] 李・松尾・永田: 熱水分同時移動を考慮した壁体応答解析 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), 767-768, 1991.
- [160] 吉田・寺井・末吉: 多層壁の熱・水分同時移動における三角波応答の離散フーリエ変換による計算法, 空気調和・衛生工学会論文集, No.46, 1991.
- [161] Zienkiewicz, O.C.: The Finite Element Method 3rd ed., McGraw-Hill, 1977. (吉識雅夫・山田嘉昭監訳: マトリックス有限要素法 (三訂版), 培風館, 1984.)

参考文献

1. 山本 隆夫, 1975, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

2. 山本 隆夫, 1976, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

3. 山本 隆夫, 1977, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

4. 山本 隆夫, 1978, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

5. 山本 隆夫, 1979, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

6. 山本 隆夫, 1980, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

7. 山本 隆夫, 1981, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

8. 山本 隆夫, 1982, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

9. 山本 隆夫, 1983, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

10. 山本 隆夫, 1984, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

11. 山本 隆夫, 1985, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

12. 山本 隆夫, 1986, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

13. 山本 隆夫, 1987, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

14. 山本 隆夫, 1988, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

15. 山本 隆夫, 1989, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

16. 山本 隆夫, 1990, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

17. 山本 隆夫, 1991, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

18. 山本 隆夫, 1992, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

19. 山本 隆夫, 1993, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

20. 山本 隆夫, 1994, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

21. 山本 隆夫, 1995, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

22. 山本 隆夫, 1996, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

23. 山本 隆夫, 1997, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

24. 山本 隆夫, 1998, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

25. 山本 隆夫, 1999, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

26. 山本 隆夫, 2000, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

27. 山本 隆夫, 2001, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

28. 山本 隆夫, 2002, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

29. 山本 隆夫, 2003, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

30. 山本 隆夫, 2004, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

31. 山本 隆夫, 2005, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

32. 山本 隆夫, 2006, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

33. 山本 隆夫, 2007, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

34. 山本 隆夫, 2008, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

35. 山本 隆夫, 2009, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

36. 山本 隆夫, 2010, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

37. 山本 隆夫, 2011, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

38. 山本 隆夫, 2012, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

39. 山本 隆夫, 2013, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

40. 山本 隆夫, 2014, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

41. 山本 隆夫, 2015, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

42. 山本 隆夫, 2016, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

43. 山本 隆夫, 2017, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

44. 山本 隆夫, 2018, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

45. 山本 隆夫, 2019, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

46. 山本 隆夫, 2020, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

47. 山本 隆夫, 2021, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

48. 山本 隆夫, 2022, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

49. 山本 隆夫, 2023, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

50. 山本 隆夫, 2024, 熱伝導率の測定, 工業新聞社, 東京.

記号表

α	熱伝達率 [kcal/m ² hK]
α'	水分伝達率 [g/m ² h(g/kg')]
β	$= \sqrt{s/a}$ [1/m], 蒸発比 [-]
$\delta(\mathbf{x})$	Dirac のデルタ関数
δ_{ij}	Kronecker の記号
ε	吸収係数 [-]
λ	熱伝導率 [kcal/mhK]
λ'	水分伝導率 [g/mh(g/kg')]
ρ	密度 [kg/m ³]
ρ_a	空気の密度 [kg/m ³]
ω	角振動数 [cycle/s]
Γ	境界
Ω	領域
a	熱拡散率 [m ² /h]
c	比熱 [kcal/kgK]
c_a	空気の比熱 [kcal/kgK]
h	$= \alpha/\lambda$
\mathbf{n}	外向き法線ベクトル
q	熱流 [kcal/m ² h]
\mathbf{q}	熱流ベクトル, 熱水分流ベクトル
r	水の蒸発潜熱 [kcal/g], 距離 [m]

s	ラプラスパラメータ [1/h]
t	時間 [h]
u	温湿度ベクトル
x	x 座標 [m]
y	y 座標 [m]
z	z 座標 [m]
A	面積 [m ²]
A	熱拡散行列 ($C^{-1}K$)
B	特長長さ (= $WD/2(W+D)$) [m]
C	熱容量行列
D	地下室の奥行き [m]
F	形態係数行列
$G(s)$	熱応答 (伝達関数) [kcal/m ² hK]
$G_A(s)$	1次元半無限体の熱応答の解析解 [kcal/m ² hK]
$G_N(s)$	規準化残差応答 [-]
G	放射吸収行列
H	地下室の高さ [m]
I	単位行列
J	日射量 [kcal/m ² h]
K	熱貫流率 [kcal/m ² hK]
K	熱伝導行列
R	壁体の熱抵抗 [m ² hK/kcal]
T	温度 [°C]
T^*	基本解 [°C]
T^e	等価気温 [°C]
T	温度ベクトル
V	風量 [m ³ /h]
W	地下室の幅 [m]
X	絶対湿度 [g/kg]
X	絶対湿度ベクトル
Y	アドミッタンス行列
\hat{T}	モード変数, 対角行列
\hat{T}	近似解
\dot{T}	dT/dt : 1階の時間微分
\ddot{T}	d^2T/dt^2 : 2階の時間微分
\tilde{T}	Laplace変換
T	転置

a	吸熱応答を表す添字
i	貫流応答を表す添字
F	床を表す添字
O	外気を表す添字
R	室を表す添字
S	吹き出しを表す添字
T	熱流を表す添字
W	壁を表す
X	水分流を表す添字
$[T_i]$	行ベクトル
(X_{ij})	X_{ij} を要素としてもつ行列

謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院工学系研究科在学時より、継続して行ってきた研究をまとめたものです。本論文をまとめるに当たり、御指導御協力を頂いた方々に最後にお礼を申し上げたいと思います。

まず、在学中は指導教官として、助手として採用して頂いてからは研究室の直接の上司として、終始御指導して頂き、本論文の主査をお引き受け頂いた松尾陽教授に、深謝いたします。再三の叱咤激励にもかかわらず、なかなか論文を書かない不出来な弟子ではありましたが何とかまとめることができたのも、松尾教授に辛抱強く御指導が頂けたからからに他なりません。また、東京大学の安岡正人教授、鎌田元康教授、坂本雄三助教授、加藤信介助教授には、貴重なお時間をさいて本論文の副査をお引き受け下さり、非常に有益な御意見を頂くことができましたことに感謝いたします。特に、坂本助教授には、建設省にいらした当時より委員会の席で御指導を頂きました。

第7章の実験は、建設省総合プロジェクト「地下空間の利用技術の開発」の一環として行われたものであり、設計・測定などを担当された委員の方々にお礼します。また、委員会終了後も実験を継続しそのデータを快く提供して下さいた東京理科大学の井上隆助教授とその研究室の方々にお礼します。井上助教授は、筆者が学部学生当時、松尾研究室の助手をされており、筆者が地下室の熱環境を研究するきっかけを与えて下さいました。第3章、第6章、第8章は、「大規模地下空間の熱湿気環境予測に関する調査研究」委員会におけるプログラム開発の過程で検討したことを中心にまとめており、委員会委員各位から有益な助言を頂きましたことを感謝致します。

最後に、研究室とともに研究した諸先輩後輩・学生の方々には、直接間接に非常にお世話になりました。ここに記して謝意を表します。

