

熱・換気回路網計算プログラム NETS

奥山博康

清水建設（株）技術研究所

1. はじめに

建築の伝熱・換気のシステムシミュレーションのために熱・換気回路網モデルによる NETS と呼ぶ計算プログラムを開発している。一つの特長はモデル化の自由度が高く汎用性に優れていることであり、建築設備や意匠の設計者や開発者が考案する新たな工夫を自由に計算モデル化し、検討できることを狙いにしている。十数年来開発してきた Fortran 言語による本体部分を NETS と呼んでいるが、開発当初に想定した計算対象物は、パッシブソーラーハウスであった。ある種のパッシブソーラーハウスでは、空気の循環の経路の変更や断熱パネルの開閉を時間帯や季節あるいは温度状況によって変化させることで熱移動の制御を行うが、これは計算モデルの構造がスケジュールやフィードバック制御で変化することであり、NETS はこうした変化の模擬にも適している。ここ 2 年ほどはプリとポストの処理プログラムの開発も進めており、これらはそれぞれ NETSGEN と NETSOUT と呼んでいる。また全体の処理システムは NETS システムと総称している。本論では計算モデルの特徴、計算理論の概要、プリ・ポスト処理プログラムの概要と、この計算プログラムの特長を活かした適用事例などについて述べる。

2. 熱回路網の計算モデルの特徴

熱回路網の数学モデルは、何らかの空間的離散化手法によって得られる熱容量節点系とも呼んでいるモデルに関するもので、節点*i*と節点*j*間の伝導、放射、対流伝達、移流や貫流などの全ての熱移動形態を一般化熱コンダクタンス c_{ij} と呼ぶ種類の係数で表現している。また節点に関する熱収支式は、次式のようにそれぞれの節点は他の全ての節点と熱的に結びついているとする完全連結システムの節点方程式と呼ぶもので定義している。ここに x_i は節点*i*の温度、 m_{ij} は節点*i*に関する熱容量、 c_{ij} は節点*j*から*i*に向かう一般化熱コンダクタンス、 g_j は総個数 n_g のうちの*j*番の発熱源、 r_{ij} は g_j から*i*番節点に流れ込む比率を表す。また n_0 は外気温度の様な既知数扱いの温度の総節点数であり、 n は未知数扱いの温度の総節点数である。

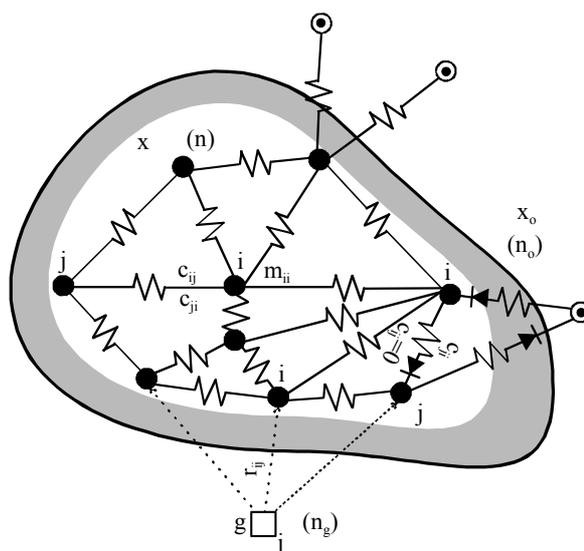


図 1 熱回路網の概念図

$$\sum_{j=1}^n m_{i,j} \cdot \dot{x}_j = \sum_{j=1}^{n+no} c_{i,j} \cdot x_j - \sum_{j=1}^{n+no} c_{j,i} \cdot x_i + \sum_{j=1}^{ng} r_{i,j} \cdot g_j = \sum_{j=1}^{n+no} c_{i,j} \cdot (x_j - x_i) + \sum_{j=1}^{ng} r_{i,j} \cdot g_j$$

この計算対象物の空間次元や形に依存しないで一般的に成り立つ完全連結システムの節点方程式により、熱容量節点系の全体でも次式のベクトル・マトリックスの常微分方程式が構成される。この式をシステム理論の応用数学にならって状態方程式と呼んでいる。

$$M \cdot \dot{x} = C \cdot x + C_o \cdot x_o + R \cdot g$$

計算対象物によって異なってくるのはシステムのパラメータ $c_{i,j}$, $m_{i,j}$, $r_{i,j}$ か、モデルのサイズ n , n_o , n_g だけである。計算対象物に応じてゼロでないシステムパラメータだけを与えれば、与えていないシステムパラメータは何もしなくてもゼロである。以上のことが全体方程式を構成したり、常微分方程式を解く計算プログラムが完全な汎用性を持つ理由である。さらに空間離散化の手法は有限体積法をとることが多いが、部分的に有限要素法を用いても、これらの異なった手法による部分的なモデルを融合して、全体システムについても上記の方程式モデルで一体的に計算することが可能であるように工夫している。この工夫とは、従来の有限要素法の境界条件に関連する定式化の改良と、システムパラメータの添字番号定義に関するものである。

温度などの状態値の時間変化をシミュレートしていくことは常微分方程式の時間積分を行うことに帰着す

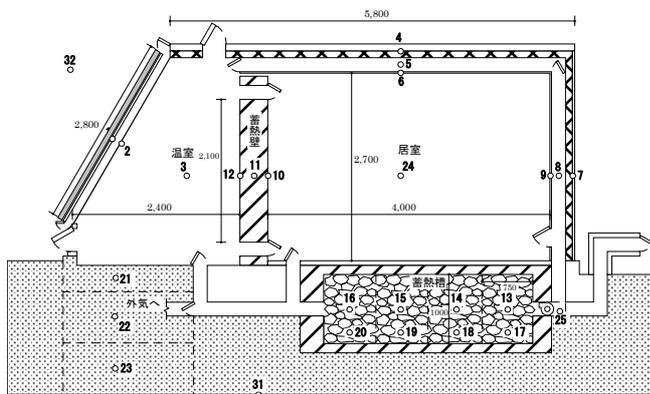


図 2 パッシブソーラーハウス計算モデル断面図

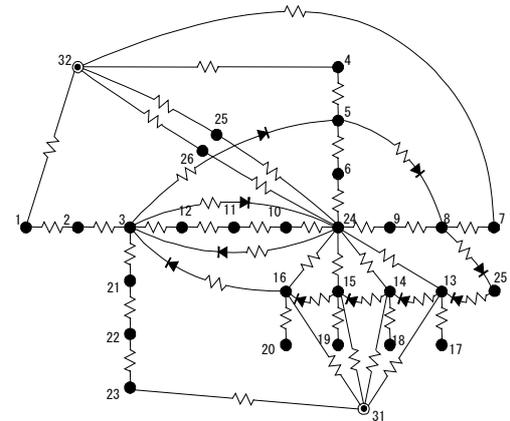


図 3 熱回路網モデル図(冬季昼間)

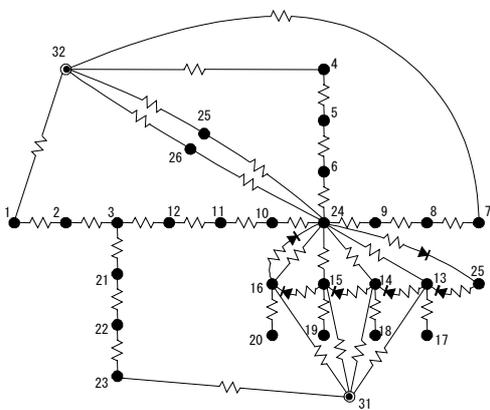


図 4 熱回路網モデル図(冬季夜間)

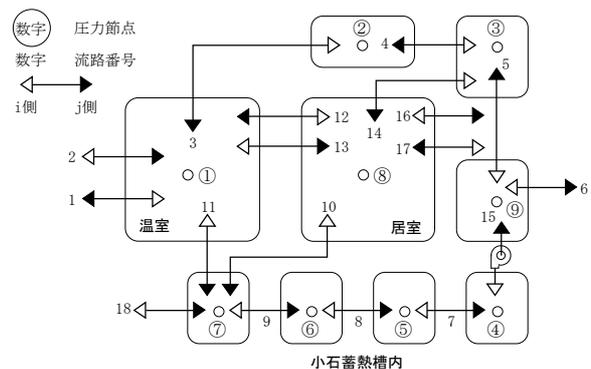


図 5 換気回路網モデル図

る。従来用いられている時間積分法には多くの種類があるが、それらは全て近似解である。これに対して筆者は厳密解を提示している。これを射影分解による解析的時間積分法と呼んでいる。しかしこの厳密解を得るためにはシステム・マトリックスの固有値解析が必要であり、大次元マトリックスの場合は確実に迅速に固有値を求めるのは多くの場合困難である。そこで実用上は近似時間積分法を用いることになるが、この場合最も重要なのは計算安定性である。安定性のために空間的また時間的な離散化に条件が付くことによって、計算時間と主記憶容量が増大することになり、実用性を損なうことが多いからである。NETS で多く用いられるのは完全陰伏解法（後退差分）である。さらにこの解法において必

要となるシステムマトリックスの逆行列計算量を軽減するために、その行方向を分割し、近似的に逆行列を計算する方法も適用できる。あるいは状態方程式の濃縮理論によって実質的な節点数を減らし、計算機的な経済性を向上する方法も適用できる。この濃縮法は、将来空間的自動メッシュ分割などを適用した場合に問題になるであろう節点数の過度の増大を解決する方法にもなる可能性がある。

3. 換気回路網の計算モデルの特徴

換気回路網は、基本的にはゾーンと流路の二つのモデル要素から構成される。例え分岐するダクト系を持つとしても、分岐点にゾーンを仮定すれば、結局はこれらの二つのモデル要素に還元されてしまう。ただしこの一般化のためには、ゾーンの底面で持つ静圧は、動圧も加算された全圧と見なすモデル化の考え方を必要とする。従ってこうしたモデルを全圧節点系と呼ぶことにした。全体システムの数学モデルは、もし該当するとすれば、圧力仮定法をとった場合に行う繰り返し計算過程で、ステップ毎に構成される線形連立方程式系であろう。これは全圧のベクトルと、このベクトルに関するヤコビアン・マトリックスによる連立方程式系である。NETS ではこの方程式系を単純なアルゴリズムとデータ構造で構成するために、流路における風上側の全圧節点（ゾーン）番号と風下側のそれを内蔵する配列を定義し、風量収支の計算においては、然るべき全圧節点（ゾーン）番号にこれらの番号配列を介して間接アドレスすることにより、アルゴリズムを単純なものにしている。また普通のニュートン・ラプソン法では振動を起こす仕組みを明らかにし、修正ニュートンラプソン法と呼ぶものを提案した。

4. 駆動条件

駆動条件とは、モデルを動かしていく条件のことであり、外気温変化や日射量変化のような気象条件によるものと、人為与条件と呼ぶ温度、発熱量、ガス濃度、ガス発生量などの他、モデル自体の構造的ないしはパラメータ的な変化も意味する。これらの駆動条件はスケジュールで実施できる他、フィードバック制御によっても実行することができる。モデル自体の構造的・パラメータ的な変化をモード変化と呼んでいる。例えば熱回路網では、一般化熱コンダクタンスのつながりが切れたり、値が変わったりすることであり、換気回路網では、開口面積や圧力損失係数が変化したり、送風機の回転数が変化したりというようなことを意味す

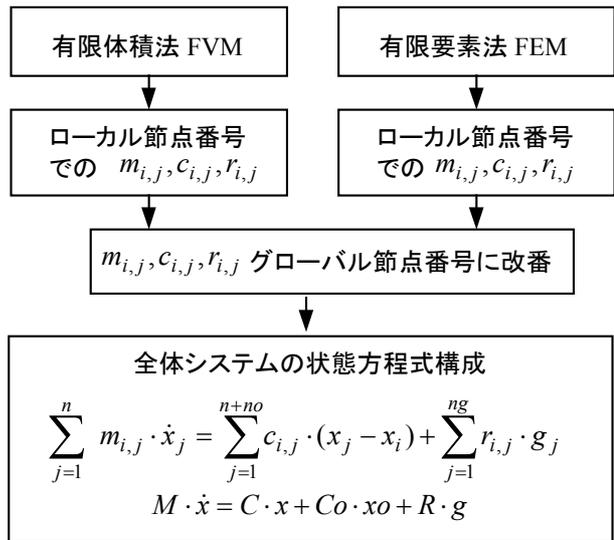


図 6 異なる離散化モデルの統合

る。モード変化は、モデル要素の全体集合において部分集合を幾つか定義した上で、それぞれにおいて独立して定義される。具体的には、部分とそれぞれの部分のモード番号によって管理される。ここに部分とは前述の部分集合のことであり、必ずしも空間的な部分を意味するものではない。スケジュールによる駆動条件制御は日パターンという考え方で管理される。例えば平日と休日では日パターンが異なる。日パターンで定義できるのは、モード変化、システムパラメタの変化、人為与条件とフィードバック制御である。こうした条件の一日の変化パターンを日パターンと呼んで何通りか作っておく。そしてこれらの日パターンを、どのような周期で実行していくかを定める表を日パターンの周期内定義表として定義する。フィードバック制御則は、感知量から操作量までの手続きとして定義される。この操作量の一つとして前述のモード番号も含まれる。フィードバック制御則の実行日パターンも定義される。フィードバック制御の一つとしてPID制御も実行できる。PID制御の効用は、本シミュレーションでは実現象と異なり、感知量測定から制御操作の実施まで時間積分間隔の遅れがあることによる不都合を解消することと、操作量と制御量の関数関係が未知である場合に対処すること等である。ちなみに時間積分間隔は、最小1分から最大1時間までとることができる。一方気象データは一時間間隔なので、この間は線形補間される。またNETSは、普通の熱負荷計算のように、室温拘束による冷暖房状態の計算も可能である。この場合は未知数温度扱いの節点が既知数温度扱いの節点に変わる等の変化があるので、節点番号の改番とシステム状態方程式のサイズの変更などがNETS内で自動的に行われる。

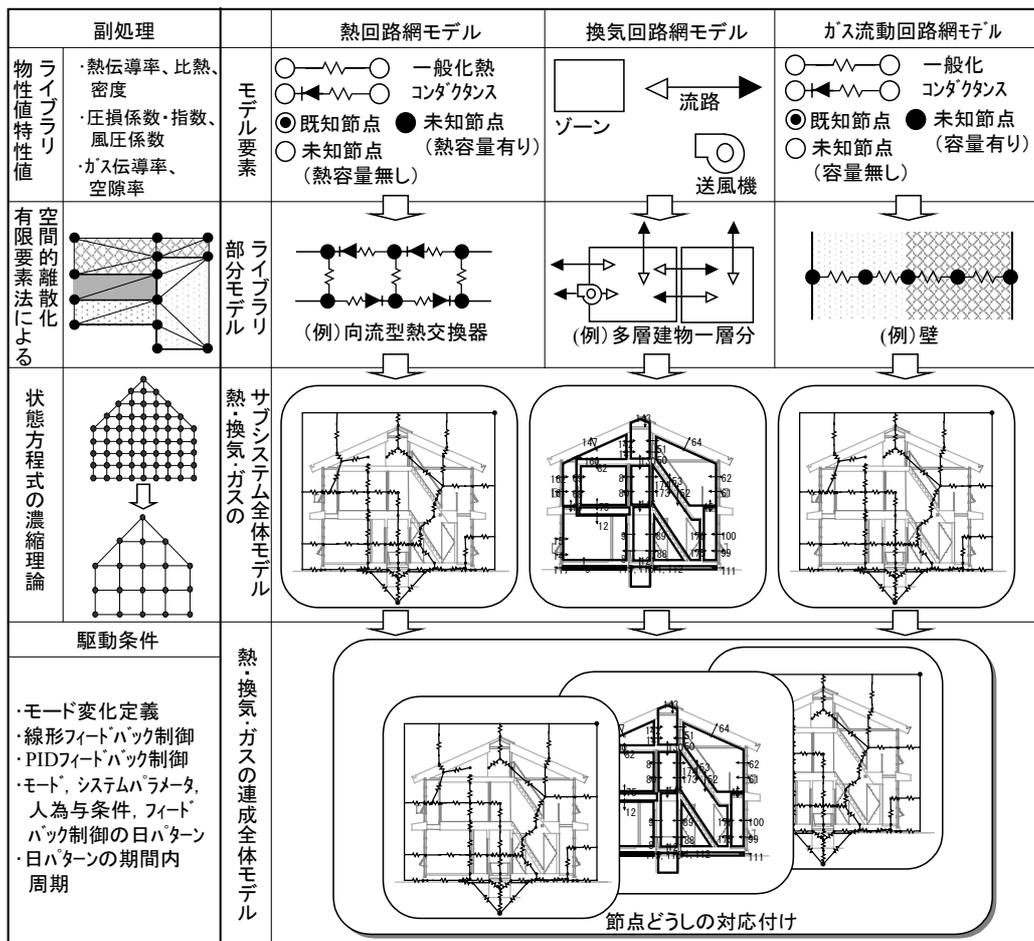


図7 プリ処理システム NETSGEN の概要

5. プリ・ポスト処理システム

NETSGEN のモデル作成では、CAD の図を下敷きにしてモデルの構造を描いていくことができる。また頻繁に用いられる類型的な部分は部品としてライブラリ登録しモデル作成作業効率を高めることもできる。本熱回路網モデルの数式モデルは有限要素法モデルと互換性を持つので、壁体等は一次元有限要素法で作成し、さらに部品化しておくことができる。二次元有限要素法モデルも作成することができ、これらも部分として、他の有限体積法の全体モデルの中に取り込んで融合することができる。換気回路網でも部品ライブラリ機能がある。送風機は、固定風量の扱いと、P-Q 特性の 3 次曲線により変動する風量の扱いのどちらでも適用でき、任意の流路に取り付けることができる。熱・換気回路網のモデル構造が描かれた後で、節点、一般化熱コンダクタンス、ゾーンや流路のモデル要素をクリックしてダイアログを開き、数値的な定義を行う。モード変化の定義は、基本モデルの図に部分的な修正を施して行う。NETS はこの変化の差の分のパラメータを格納する。熱、換気、ガス流動回路網モデルの節点番号の対応付けは、これらのうちの二者を左右に比較して見られる画面において直感的に行える。駆動条件の様々な定義も節点番号などのモデル要素番号を気にする必要はなく、モデル図において該当要素をクリックして定義できる。

NETSOUT の計算結果表示は大別して、温度、ガス濃度、室内圧、風量、PMV や熱負荷等の状態値に関する空間分布表示と、これらの状態値の時系列表示に分けられる。またモード変化やフィードバック制御の実行状

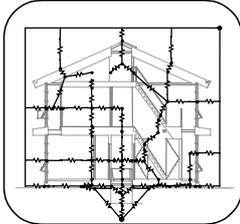
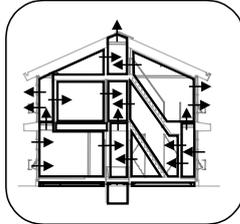
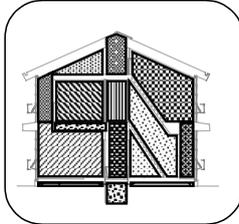
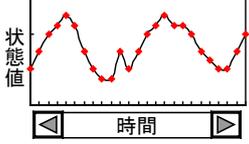
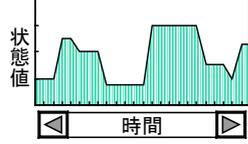
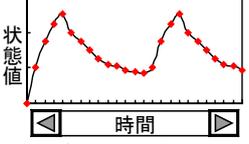
		全体モデルの運転状況							
各部分のモード状態	部分番号	0	1	2	3	4	5	6	部分とは空間的な意味だけではなく、一般にモデル構成要素の全体集合に対する部分集合も意味する。
	モード番号	1	1	3	1	1	2	1	
制御則の実行状態	制御則番号	1	2	3	4	5	6	7	制御則とは、任意の感知量による任意の操作量までの演算手続きを意味し、モード番号も操作量の一つとなる。
	ON/OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	
		熱回路網モデル		換気回路網モデル			ガス流動回路網モデル		
状態値の空間分布	 温度やPMVの分布  風量の分布とゾーン静圧 風量と向き ゾーン底面静圧 送風機 運転点 等温線		 ガス濃度の分布 等濃度線						
	 状態値 時間 温度変化 PMV変化 熱負荷変化 発熱量変化		 状態値 時間 風量変化 ゾーン静圧変化 送風機風量変化			 状態値 時間 ガス濃度変化 ガス除去量変化 ガス発生量変化			

図 8 ポスト処理システム NETSOUT の概要

況も確認できるようになっている。状態値の空間分布は原則的にモデル要素の近傍に数値表示する。一方状態値の時間変化は横軸が経過時間のグラフ表示をし、任意の時間帯の部分をスクロールして見ることができる。

6. 躯体蓄熱への適用事例

昼間の冷房負荷を夜間の躯体蓄熱で減らし、電力負荷の平準化に寄与する方法について、NETS を適用して検討した事例について述べる。この躯体蓄熱の方法は、天井カセットエアコンの吸い込み側と吹き出し側それぞれに流れの切り替えダンパを取り付け、吸い込み先が室内だけでなく天井裏にもでき、また吹き出し先も室内側だけでなく天井裏にもできるようにしたものである。それぞれの切り替えダンパで2通りの流れ方のモードがあり、二つのダンパの全部で $2 \times 2 = 4$ 通りのモードが存在することになる。これらのモードは、蓄熱モード、放熱モード、放射冷暖房モード、蓄熱保持の通常冷暖房モードと呼ばれる。放射冷暖房モードとは、天井裏空間に吹き出して加圧することにより、天井板を冷却/加熱しながら通気して、放射冷暖房効果も狙うものである。

標準的な事務所建物で、平面的に $6.4\text{m} \times 15.1\text{m}$ の部分を事例検討のために計算モデル化した。その断面図を図9に示す。室空間や窓硝子とブラインドに挟まれる空気層も上下方向に zonal model の考え方で分割した。床スラブは法線方向に7分割した。その他の計算条件も図9に示す。換気量は在室時間以外は隙間風状態となり内外温度差などにより変化する。換気回路網のモデル図は図10に、熱回路網のモデル図は図11

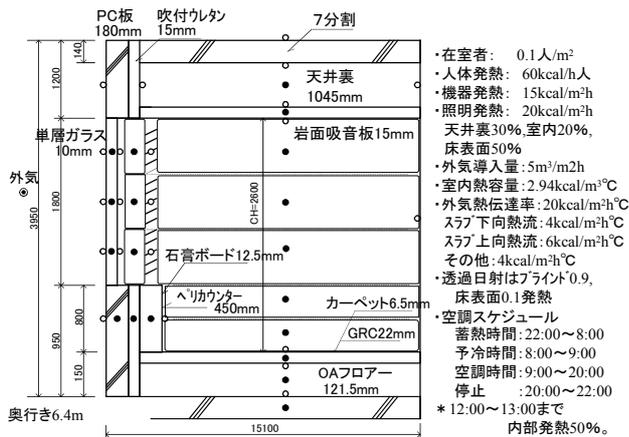


図9 躯体蓄熱の例題の条件

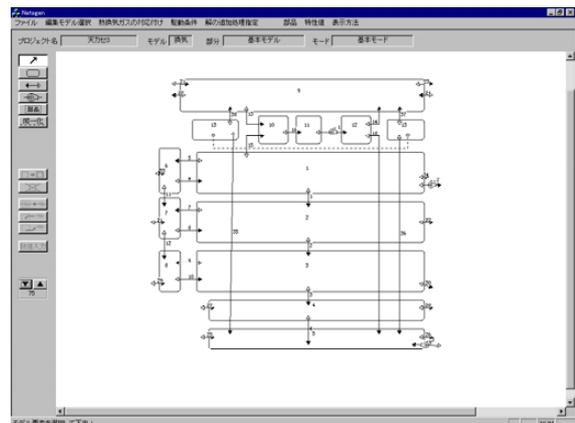


図10 換気回路網の作製

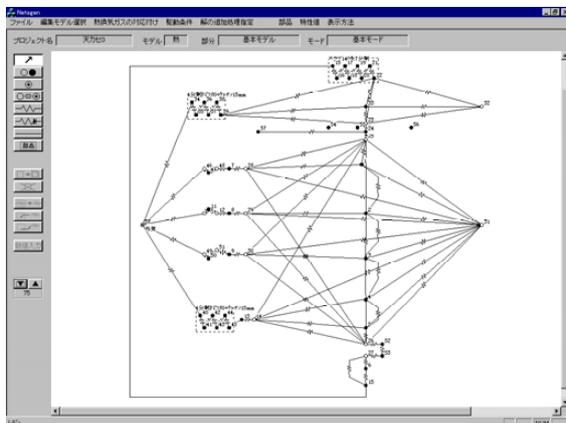


図11 熱回路網の作製

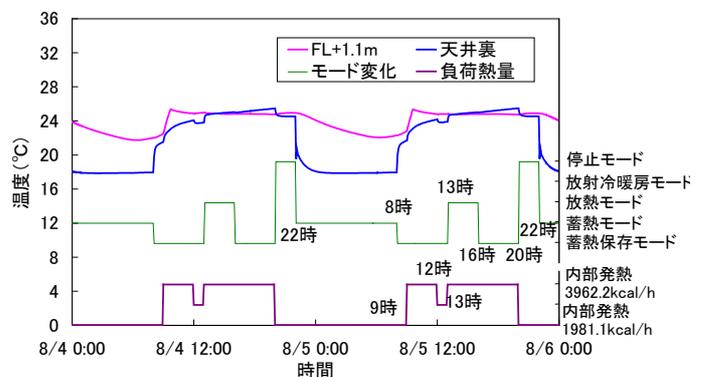


図12 モード変化

に示す。天井カセットエアコンの箱の中は、空気入り口部分、コイル部分、出口部分の3つのゾーンに分けてモデル化した。天井板が持つ空隙にもゾーンを割り当てた。熱回路網モデルでのスラブや外壁は、まず一次元の有限要素法により部品として作成した後に、全体モデル構成の中にとりこんだ。室内表面間などの放射伝熱は、対流成分と分けてモデル化した。動的熱負荷計算用の東京の標準気象データを用い、7月25日から8月2日の9日間を助走期間とした。8月4日と5日の室温、天井裏温度、モード変化、内部発熱の変化を図12に示す。図中の数字はモード変化や内部発熱の変化の時刻を表す。予冷の1時間(8時から9時まで)は外気導入を停止している。ただし夜間蓄冷の影響で除去熱量はこの間は0で間に合い、内部発熱が大きくなって初めて熱負荷が生じる結果となっている。

天井裏の空気温度については、目標18度Cにするようにコイル除去熱流をPID制御した場合と23度Cに制御した場合、一方室内の冷房については、床上1.1mのゾーンの空気温度を26度Cにするようにコイル除去熱流をPID制御した場合と、同じところでPMVを0に制御した場合等について計算した。PID制御を適用した理由は、4.に前述した効用の他に、制御量と操作量の空間的な場所が異なること等がある。図13には天井裏制御目標18度Cの場合の室温等の推移を、図14にはこの場合の除去熱量の推移を示す。次に室温制御ではなくPMVを0に制御した場合の結果を図15と図16に示す。室温は26度よりも低めになる。

除去熱流を集計し、昼間だけの普通の冷房負荷に比べ、躯体蓄熱により昼間の負荷を夜間に移行できた率(ピークシフト率)、また蓄熱したことによる熱損失(蓄熱損失率)などを計算した。これらの評価指標を8月3日

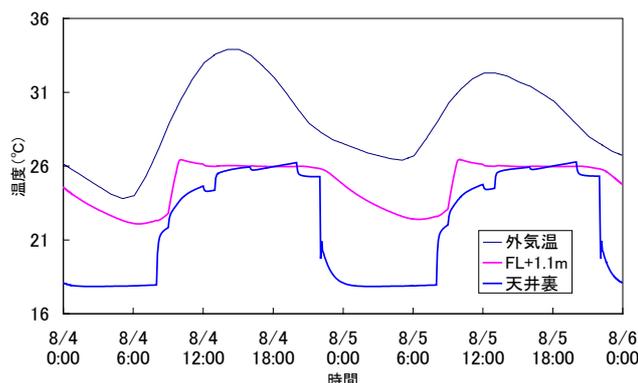


図13 室温制御の場合の温度変化

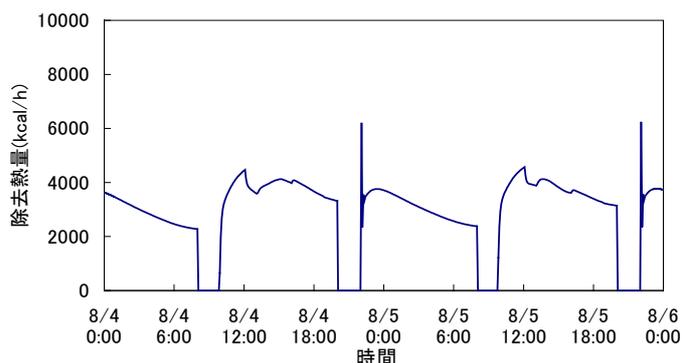


図14 室温制御の場合のコイル除去熱量変化

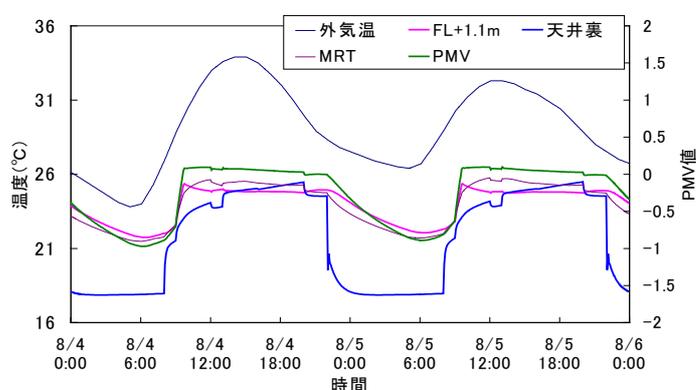


図15 PMV制御の場合の温度変化

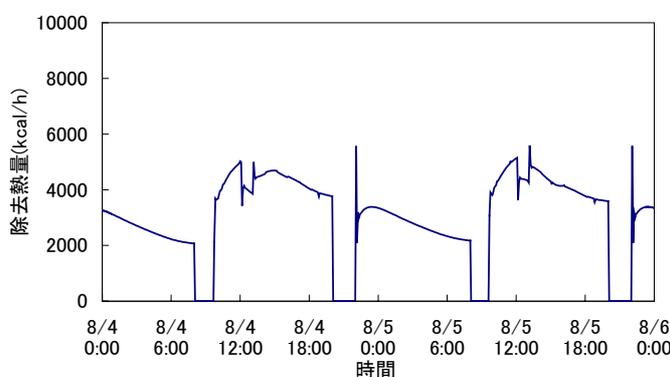


図16 PMV制御の場合のコイル除去熱量変化

から5日まで一覧表にしたものが表1である。これらの結果から、天井裏を18度C目標で蓄熱した場合にはピークシフト率が30数%になり、蓄熱損失は8%前後となる。また23度C目標で蓄熱した場合にはピークシフト率が10数%になり、蓄熱損失は4%前後となることが分かる。以上の様な新しい工夫については、従来は新たに計算プログラムを作るか追加・修正が必要であったのに対して、NETSシステムではモデルと駆動条件の一般性等により、汎用的に対応できることを示した。

7. 結論

建物の伝熱と換気に関し、現状では様々な空間的な離散化法と定式化法によるモデルが存在する中で、この熱・換気回路網モデルは汎用的で単純明快な標準モデルとして提案できる。熱回路網モデルの時間積分法に関しては、簡潔で統一的な数式表示と、より精度が高い方法を提案した。換気回路網に関しても簡潔で統一的なモデルデータ構造と、安定な解法を示した。さらにモデルの汎用性を活かしたプリ処理システムについて述べた。従来無かった伝熱構造であっても自由にモデル化して検討できる特長がある。またモード変化と呼ぶモデルの構造的な変化を取り扱うための考え方を提示し、この適用・検証事例として、躯体蓄熱の効果検討結果についても述べた。この提案する熱・換気回路網モデルの構造に則れば、従来のモデル間での互換性も実現され、標準化と統一化が可能となる。

【謝辞】

本NETSシステムのプリ・ポスト処理システムの開発は、通商産業省・生活価値創造住宅技術開発プロジェクト（通称ハウスジャパン）で実施することができました。また開発には清水建設・技術研究所の同僚の方々だけでなく、早稲田大学・建築学科の木村研究室の方々のご協力も頂きました。

【参考文献】

- [1] 奥山博康, 建築物の熱回路網モデルに関する理論的研究, 博士号学位論文, 1987年12月
 [2] 奥山博康他, 熱・換気回路網計算プログラム NETS の開発 (その2) プリ・ポスト処理システムの概要, 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集, D-14, pp269-272, 1998年8月

表1 躯体蓄熱の効果指標計算結果

天カセで夜間蓄熱を行なった場合(空気温度を感知しコイルの発熱量を操作)

	夜間負荷 A	昼間負荷 B	日負荷C	シフト率D	蓄熱損失 F	スラブ 蓄熱量G
制御 温度	天井裏を 18°C	室温を 26°C				
8月3日	30.0	31.1	61.1	0.361	0.083	20.3
8月4日	29.9	38.2	68.2	0.325	0.074	20.3
8月5日	30.9	37.9	68.7	0.326	0.081	20.2
制御 温度	天井裏を 23°C	室温を 26°C				
8月3日	14.9	43.9	58.8	0.122	0.043	10.5
8月4日	14.8	51.0	65.9	0.109	0.038	10.5
8月5日	15.6	50.7	66.3	0.109	0.043	10.4

蓄熱を行なわない場合(間欠空調)

	夜間負荷	昼間負荷	日負荷E
制御 温度		室温を 26°C	
8月3日	0	56.4	56.4
8月4日	0	63.5	63.5
8月5日	0	63.6	63.6

天カセで夜間蓄熱を行なった場合(居住域のPMV値を0に制御)

	夜間負荷 A	昼間負荷 B	日負荷C	シフト率D	蓄熱損失 F	スラブ 蓄熱量G
制御 温度	天井裏を 18°C	PMV値を0				
8月3日	27.0	36.6	63.7	0.302	0.041	17.6
8月4日	27.0	43.9	70.9	0.274	0.038	17.7
8月5日	27.9	43.8	71.7	0.276	0.044	17.6
制御 温度	天井裏を 23°C	PMV値を0				
8月3日	10.9	51.4	62.2	0.071	0.017	7.4
8月4日	10.8	58.5	69.3	0.064	0.015	7.5
8月5日	11.6	58.5	70.2	0.065	0.021	7.4

蓄熱を行なわない場合(間欠空調)(居住域のPMV値を0に制御)

	夜間負荷	昼間負荷	日負荷E
制御 温度		PMV値を0	
8月3日	0	61.2	61.2
8月4日	0	68.3	68.3
8月5日	0	68.7	68.7

- ①ピークシフト率=夜間移行率: $D=(E-B)/E$
 ②蓄熱損失: $F=(C-E)/E$
 ③スラブ蓄熱量: $G=\sum(\text{スラブの節点の温度変化} \times \text{熱容量})$
 ④日負荷C: $C=A+B$