

## システム理論に基づく建築の伝熱・換気モデル

奥山 博康

### 1 はじめに

建築の冷暖房換気においては適切で健康的な建築環境を最小の環境負荷とエネルギーで実現するため、設備以上に建築自体の計画が重要である。建築構成部材の熱伝導、蓄熱、熱放射等の熱的性質を巧みに活かし、また温度差換気や風圧換気を活かす空間構成を計画することで、外気温湿度変動、自然換気、太陽熱、蒸発冷却や地中恒温性などの自然エネルギーを利用するのが環境共生建築の基本である。このような建築を検討するためには多層で多数室の建物全体的で微妙な圧力バランスによる空気流動と熱移動を考慮しなければならないので、他分野での分析的伝熱計算モデルとは少し異なり、総合的でシステムのモデルが必要になってくる。ここで紹介するのはこうしたモデルである。

コンピュータ利用の伝熱計算は様々な分野において行われているが、有限要素法や有限体積法あるいは有限差分法が適用の融通性が良いので、よく用いられていると思われる。ここで紹介するモデルの一つは熱回路網と呼ぶが、それらのモデルを融合し一体的なモデルにすることで実用的なモデル化を可能とする骨組みでもある。この骨組みとは熱流収支に関する完全連結システムの節点方程式と名付けたものであり、どの様な空間的離散化法にも関わらず、また計算対象物の空間次元や形態にもよらず、一般的に成立する特長がある。

さらにその一体的なモデルとは連立常微分方程式であるが、システム理論の状態方程式の形にしているので、予測計算を行うための安定で厳密な時間積分法を導いたり、システム同定や最適制御理論等を応用する際のメリットもある。

次節の「2. 建築伝熱計算の背景」では本モデルを展開する動機となった従来の計算法の問題点を述べ、「3. 熱回路網モデル」では本モデルの発展の経緯を述べる。また空気流動の計算と言えば数値流体解析が良く知られているが、建築分野ではマクロスコピックながら工学的で有用な「4. 換気回路網モデル」を紹介する。また予測計算とは逆であり逆探問題とも呼ばれるシステム同定問題を、熱回路網モデルについて最小二乗法を用いて演繹して解いたので、その展開経緯を「5. 熱回路網のシステム同定理論」で述べる。さらに温度だけでなく湿度も含めて拡張した熱・湿気回路網モデルについて最適制御理論を参考に、やはり最小二乗法で演繹し、最適の冷・温水の加熱・冷却量と、この時の温・湿度の状態を決定する「6. 状態とエネルギー供給の最適化理論」を展開した経緯と理論の意義を述べる。以上の理論のうち予測計算法の開発については「7. シミュレーションプログラム NETS」として紹介する。またシステム同定理論の実用化については、従来の換気測定法がシステム同定という観点が無かったことで多くの問題を抱えていたので、これらを解決した「8. 多数室換気測定システム」を実施例と共に紹介する。

## 2 建築伝熱計算の背景

コンピュータを利用した建築伝熱計算の歴史を少し振り返れば、本モデル展開の必要性が理解されるかもしれない。それはエネルギー消費量の予測を主目的とした年間の冷暖房負荷計算の必要性から始まっている。熱負荷とは気象条件等の変動に抗して一定の室内温湿度を維持するために必要な室空気の加熱・冷却量のことであり、外壁等を貫流する熱流が主要因となる。従って壁体法線方向の1次元非定常伝熱計算が初期の研究課題とされた。何種類かの材料層から構成される多層壁体の非定常伝熱は実は解析的な解が困難で、何らかの数値的な解法にならざるを得なかった。しかし現在ならば壁体の非定常伝熱モデルとして差分法や有限要素法の離散化モデルを用いそうなところ、時系列の熱流応答係数法という計算法が米国暖房冷凍空調和工学会(ASHRAE)によって1970年頃に提案され、日本もこれにならぬ界の標準的計算プログラムとして採用され、今日に至っている。この計算法は壁体の外気側の表面温度が三角形パルス状に励起された場合に、室内側への熱流の時系列応答係数を予め計算しておき、これを用いて任意の外気温度変動に対する熱流を算出する。壁体の表面温度と熱流を4端子電極に相似させたPipes[1]の理論を基として、MitalasとStephensonらが時間的に離散的で計算可能な方法[2]を作った。こうしてモデルが導入された背景には、ちょうど制御理論における古典的な伝達関数法があったと思われる。しかし励振と応答で現象をシミュレートできるためには、対象系が線形性と時間的不変性を持つという前提が必要である。窓や雨戸の開け閉めなど伝熱構造の変化が無い事務所建築であればこれらの前提は成り立つが、そうでない住宅の場合等には大きな制約となる。また熱流だけで各部の温度を解かないことによる誤差の問題もある。こうした問題もあって、差分法や有限体積法のモデルも幾人かの研究者によって傍流的に開発されてきたが、現代制御理論に分類される状態空間法とこれらの領域型のモデルとを関連付

けて発展させようという考えは見られなかった。またシステム理論という高所の視点からのモデルにできれば、予測計算だけではなく、システム同定、最適制御あるいは最適設計といった問題も統一的に認識されるのではないかと思われる。

## 3 熱回路網モデル

本論で要となる筆者の熱回路網モデルの展開の経緯を述べる。この言葉自体は英語ではThermal Network Modelとして国内外で認識されるが、その意味するところは未だ人によって様々である。コンピュータが十分発達していなかった時代に、様々な物理現象を電気回路にアナロジーし実験していた頃から熱回路網という言葉が始まった様である。しかし数値計算機が発達してくると、熱回路網の定式化法は研究者によってまちまちなものになっていった。例えばClarke J. A.[3]やEdward F. Sowell[4]によるものもあるが、筆者の定式化法は計算対象物の形状や空間次元によらず汎用的に成立し、少し異なっている。筆者の熱回路網モデルは太陽熱集熱器の計算から始まった。こうした伝熱系では、伝導、表面伝達、対流や放射など様々な伝熱形態が存在する。これら全てを同じパラメータの熱コンダクタンス $c_{ij}$ で表現したWisconsin大学の太陽エネルギー研究所によるモデル[5]が、汎用的な熱流収支の節点方程式を工夫する上で参考になったが、全体の連立常微分方程式の定式化法と解法に関しては改良が必要だった。本熱回路網の基本方程式は表1に示すように、節点での熱流収支を記述した常微分方程式であるが、汎用的に成立する理由は、前述の様々な伝熱形態を一種類の一般化熱コンダクタンス $c_{ij}$ で表していることと、それぞれの節点は他の全ての節点と結びついていると記述していることにある。これらの定式化法はコンピュータプログラムの一般的特性にもマッチしている。なぜならば、ある二つの節点 $i$ と $j$ の間が実際につながっているところだけ非零の $c_{ij}$ を配列に格納すれば、何も代入されない配列要素の $c_{ij}$ は自動的に

表1 基本方程式と記号表

熱流等の取支式(完全連結システム)の節点方程式	$\sum_{j=1}^n m_{ij} \cdot \dot{x}_j = \sum_{j=1}^{n+n_0} c_{i,j} \cdot (x_j - x_i) + \sum_{j=1}^{n_0} r_{i,j} \cdot g_j$
熱回路網の状態方程式	$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{C}_0 \cdot \mathbf{x}_0 + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g}$
射影分解による解析的時間積分(NETSに含まれる)	$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i \cdot e^{\alpha_i(t-t_0)} \cdot \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i \cdot e^{\alpha_i(t-r)} \cdot \mathbf{f}^*(r) dr$
システムパラメータ同定のための評価関数(SPID)	観測方程式誤差の二次形式の時間積分 $J_i = \int_0^T \mathbf{e} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{e} dt$ を最小にするシステムパラメータベクトルを求める (システムパラメータとは、 $m_{ij}$ , $c_{ij}$ , $r_{ij}$ の三種の係数を意味する)
最適制御のための最適化の評価関数(SOCS)	状態値と入力ベクトルの目標との偏差の二次形式 $J_c = {}^t(\mathbf{x} - \mathbf{r}) \cdot \mathbf{W}_x \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{r}) + {}^t(\mathbf{u}_c - \mathbf{d}) \cdot \mathbf{W}_c \cdot (\mathbf{u}_c - \mathbf{d})$ を最小にする状態と制御入力ベクトルを決定する

- $n$  : 未知数扱い総節点数
- $n_0$  : 既知数扱い総節点数
- $n_g$  : 自由入力発生源総数
- $x_i$  :  $i$ 番節点の状態量(温度等)
- $m_{i,j}$  :  $i$ 番節点に関する容量(熱容量等)
- $c_{i,j}$  :  $j$ 番から $i$ 番節点へのコンダクタンス
- $r_{i,j}$  : 自由入力発生源 $j$ から節点 $i$ への入力係数
- $g_i$  : 自由入力発生源 $i$ での発生量
- $\mathbf{x} = {}^t(x_1, x_2, \dots, x_n)$  : 状態ベクトル
- $\mathbf{x}_0 = {}^t(x_{n+1}, \dots, x_{n+n_0})$  : 既知状態入力ベクトル
- $\mathbf{g} = {}^t(g_1, g_2, \dots, g_{n_g})$  : 自由入力ベクトル
- $\mathbf{M}$  :  $m_{ij}$ による容量マトリックス
- $[\mathbf{C}, \mathbf{C}_0]$  :  $c_{ij}$ によるコンダクタンスマトリックス
- $\mathbf{R}$  :  $r_{ij}$ による自由入力マトリックス
- $\alpha_i$  :  $\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C}$ の固有値
- $\mathbf{P}_i$  : 固有値 $\alpha_i$ に関する射影子
- $\mathbf{f}^*$  :  $\mathbf{M}^{-1} \cdot (\mathbf{C}_0 \cdot \mathbf{x}_0 + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g})$ なる駆動ベクトル, 詳しくは[20]
- $\mathbf{r}$  : 状態制御の目標値, 詳しくは[18]
- $\mathbf{W}_x$  : 状態の目標値からの偏差の二次形式への重みマトリックス
- $\mathbf{u}_c$  : 制御ベクトル
- $\mathbf{d}$  : 操作量の規準とする参照値(0や外気温度)
- $\mathbf{W}_c$  : 操作量の二次形式への重みマトリックス
- $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a}$  : で表される観測方程式誤差, 詳しくは[12]
- $\mathbf{W}$  : 一般化最小二乗法の重みマトリックス
- $T$  : 測定期間

零だからである。この意味でこの基本方程式を完全連結システムの節点方程式と呼んでいる。

システム理論との関連に未だ気が付かなかった当初は、連立常微分方程式を時間的な後退差分で解いていたが、なぜこの積分法の安定性が良いか

分からなかった。一方、建築設備の分野でも現代制御理論の応用が検討され始めていた1977年当時に Julius T. Tou が著した状態空間法の解説書 [6]が参考になり、状態方程式の形に則るように定式化を改良したことから理論的な展開を始めた。

数学者の清水達雄や同僚の清川哲志の助言もあって、時間積分の安定性条件等の考察だけでなく、表1に示すシステムの固有空間に対する射影分解による厳密な時間積分の導出もできた。ただし固有値解析を迅速安定に行う方法の研究課題を残しており、この点は逆行行列計算だけですむ後退差分の近似時間積分が実用上優っているの、殆どの実務的計算ではこちらを適用している。

また有限要素法等の数学的空間離散化法との関連を解明していなかった初期の熱回路網モデルでは、工学的判断により熱流収支を仮定する部分に分割する有限体積法を用いていた。しかし'84年頃になって有限要素法における全体方程式を、温度境界と熱流境界の定式化の改良を行うことで、状態方程式に対応させることができた[9]。図1と図2の様に両者のモデルは、状態方程式というプラットフォームで、マトリックス要素記法と一致した一般化熱容量  $m_{ij}$ 、一般化熱コンダクタンス  $c_{ij}$  を介して互換性と融合性を持つようにした。

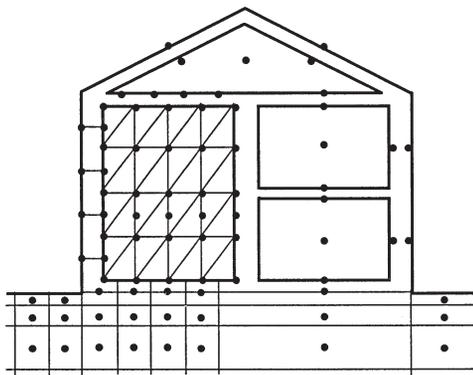


図1 異種離散化モデルの融合

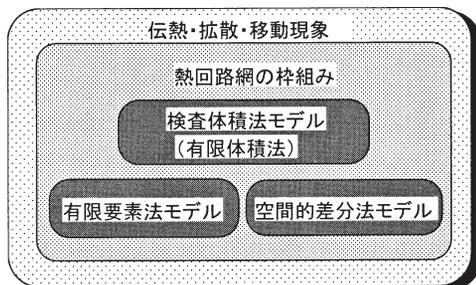


図2 熱回路網のプラットフォーム

#### 4 換気回路網モデル

換気回路網という言葉自体も数値計算機発達以前の古くからあり、隙間や開口等の流路の通気抵抗に相似した電気抵抗素子を用いた回路網により、実験的に解を求めていた時代もあった様であるが、筆者のものの展開の経緯を述べる。換気回路網も熱回路網と同様にコンピュータ利用に変わってからは様々な定式化法や解法が導かれた。ただし熱流は温度差に比例するのに対し、風量は圧力差の0.5乗に比例することが多い点が熱回路網と異なっている。各室では風量収支の式が成立する。従って流路の総数だけの風量と室数分の圧力(床面での静圧)が非線形連立方程式の解くべき未知数となる。しかし非線形連立方程式を解く場合に有効なニュートンラプソン法を、圧力修正の収束計算方法として適用すると必ずしも正確に到達しない問題が分かってきたので、様々な解法が工夫された経緯[7]がある。筆者の方法は、その振動のメカニズムの考察により、本来のニュートンラプソン法による修正量を半分にして施す修正ニュートンラプソン法と呼ぶ方法を用いている。流れの計算方法には、ミクロスコピックな数値流体解析と、こうした換気回路網のようなマクロスコピックな方法がある。換気回路網は、多層多数室的な建物全体の空気流動を計算するのに適しているが、圧力損失係数の取り方等に問題を残し、一方数値流体解析は、そうした工学的で実験的係数をあまり必要としない反面、建物全体的適用には問題がある。従って将来的にはこれらのマクロとミクロのモデルを融合したモデルの研究開発が望まれる。この融合モデルとしては、全圧あるいは静圧を節点の状態値として持つ圧力節点を修正ニュートンラプソン法によって強く連成して解くモデルが、計算安定性の実用性から良いのではないかと考えている。

#### 5 熱回路網のシステム同定理論

筆者のシステム同定理論の展開には、D. V. Pryor と C. Byron Winn による建築的太陽熱利



リズムで構成する問題と、次に離散時間的な解式に改良する問題があった。前者の問題は既に解決されていたが、後者の問題解決に年月を要した。まずよく知られている最適レギュレータ制御問題に取り組んだ。この時に、離散時間システムに関して、随伴状態ラグランジェ乗数法を最小二乗法で解く方法[17]が有用である事が分かった。この研究で当初は非定常モデルを扱っていた。しかし冷暖房換気分野において最適レギュレータを適用する利点はあまり無かった。それは拡散系の状態方程式モデルの固有値は実負であることが証明[20]できるように、本来安定な系だからでもある。そこで最適制御ではなく、最適設計理論への応用が視野に入ってきた。建物だけでなく熱交換器と人体のモデルも含め、さらに扱う状態も温度だけでなく湿度も含めた状態ベクトルを持つ拡大した系の熱・湿度回路網モデルに関して、表1に示すような評価関数から出発し定常状態の最適解[18]を導いた。この評価関数は二次形式とし、中身はいわば温冷感中立性、省エネ性、そして有効エネルギーの省エネ性に関する三項から成立させている。これらそれぞれの項の数量的意味について、温冷感中立性は熱的中立状態にある人体の軀幹温度と36.8°Cの差の二乗であり、省エネ性は供給エネルギーとゼロの差の二乗であり、また有効エネルギーの省エネ性とは熱交換器に流す冷水/温水と外気温度の差の二乗である。これらの三項には前述の差の二乗に関係した大きさの重み係数を乗じた上で、最小化すべき評価関数を形成している。現状の冷暖房システム設計は空気温度偏重であることは否めない。人間の温冷感には空気温度だけでなく周囲の熱放射環境にも大きく左右される。熱放射環境を考慮した冷暖房とは、何もパネルヒーターや床暖房だけを意味するのではなく、壁・床・屋根の様な軀体自体の適切な断熱も大いに関係する。それは室内表面温度が改善されるからである。さらに現状の冷暖房システム設計は、エネルギーの質を十分考慮せず、量の評価に偏っている。ぬるい冷温水で間に合うシステムならば廃熱

や太陽熱等が有効に利用できる。こうした最適化のモデルと解法によれば、より省エネで省資源なシステムの設計が適切に行えると考えている。しかし未だ本理論は最適制御理論の域を出ていない。システムへの最適入力を決定するだけだからである。本格的な最適設計理論においては、システムのパラメータも最適化できなければならない。そのためには非線形の最適化問題を解かなければならないだろう。なお前述した状態とエネルギー供給の最適化計算プログラムはSOCS(Systematic Optimum Control Strategy)と呼んでいるが、未だグラフィカルユーザーインターフェイスは開発していない。

## 7 シミュレーションプログラム NETS

NETS(NETwork model Simulation)と呼んでいる熱・換気回路網モデルによるシミュレーションプログラムの開発経緯について述べる。筆者はこのKernel的プログラムを作成してきた。しかし図形的な入出力処理プログラム即ちユーザーインターフェイスが無いと使い難い。幸い平成12年度まで6年間続いた経済産業省の住宅開発プロジェクト、通称ハウスジャパンの機会を得て、その図形的前後処理プログラムの開発[19]をすることができた。この開発の方向性について、NETSは他の技術計算プログラムとは正反対をめざした。一般人よりも専門家向けに、適用先を特化するよりも汎用に、計算内容はブラックボックス化するよりもホワイトボックス化を狙った。熱・換気回路網のモデル図自体が連立方程式の構造を明示している。一般人には分かり難いかもしれないが専門家には安心できる。適用問題を特化すればモデル作成は簡単になるが、新規の研究的問題検討には不十分となる。NETSは図3に示すように、従来の固定的な計算モデルでは困難な新規の建築的工夫を検討するために適しているが、一般には建築的省エネ手法の検討、温熱環境の検討、受動的な冷暖房装置や熱源装置の検討、空気質とその改善方法の検討、換気システムの検討、

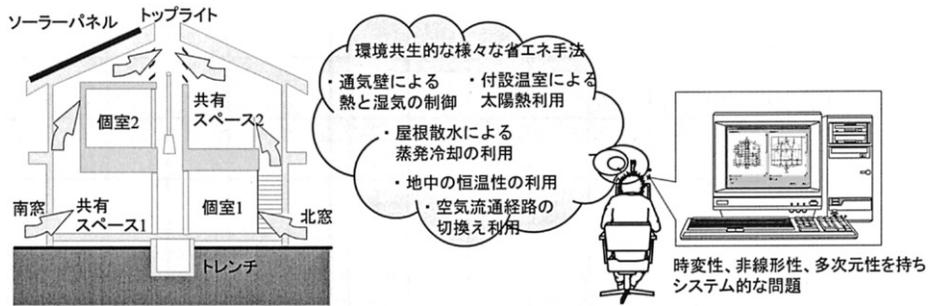


図3 エキスパート用ツール NETS の適用問題

	副処理	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
物性値特性値	ライブラリ ・熱伝導率、比熱、密度 ・圧損係数・指数、風圧係数 ・ガス伝導率、空隙率	モデル要素 ○ 一般化熱コンダクタンス ● 既知節点 ● 未知節点 (熱容量有り) ○ 未知節点 (熱容量無し)	ゾーン ← 流路 送風機	一般化コンダクタンス ● 既知節点 ● 未知節点 (容量有り) ○ 未知節点 (容量無し)
有限要素法による空間的離散化	部分モデル	(例) 向流型熱交換器	(例) 多層建物一層分	(例) 壁
状態方程式の濃縮理論	サンシステム全体モデル	熱・換気・ガスの連成全体モデル		
駆動条件	熱・換気・ガスの連成全体モデル	節点どうしの対応付け		
	・モード変化定義 ・線形フィードバック制御 ・PIDフィードバック制御 ・モード、システムパラメータ、人為と条件、フィードバック制御の日パターン ・日パターンの期間内周期			

図4 入力処理プログラム NETSGEN

結露の検討等に用いられている。

入力処理プログラムを NETSGEN, 出力処理プログラムを NETSOUT と呼びそれぞれ図4と図5に示す。NETSGEN では幾つかのモデル要素をつなぎ合わせてモデル図を描いていく。また頻り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。壁体等は一次元有限要素法で作成し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部品として全体モデルの中に融合することができる。また数学的に節点数を減らして経済的

な近似モデルを作ることもできる。熱・換気回路網のモデル構造を描いた後で、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、内部パラメータの定義を行う。モデルの構造的あるいはパラメータ的な変化をモード変化と呼ぶ方法で扱えることも特徴である。さらに熱、換気、ガス流動回路網モデル相互の対応付けは、これらのうちの二者を比較して見られる画面において直感的に行える。また様々な状態量を感じて様々な量を操作するフィードバック制御則を組むことができる。NET-

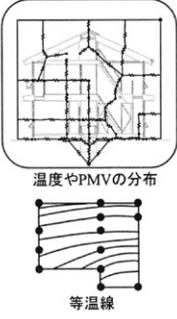
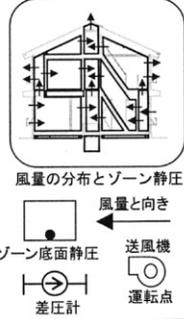
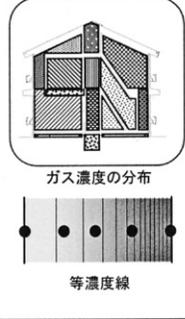
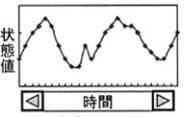
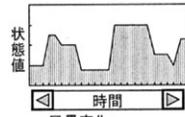
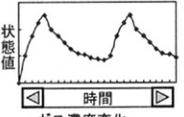
		全体モデルの運転状況							
各部分のモード状態	部分番号	0	1	2	3	4	5	6	部分とは空間的な意味だけではなく、一般にモデル構成要素の全体集合に対する部分集合も意味する。
	モード番号	1	1	3	1	1	2	1	
制御則の実行状態	制御則番号	1	2	3	4	5	6	7	制御則とは、任意の感知量による任意の操作量までの演算手続きを意味し、モード番号も操作量の一様となる。
	ON/OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	
状態値の空間分布	熱回路網モデル	換気回路網モデル		ガス流動回路網モデル					
									
	温度やPMVの分布 等温線	風量の分布とゾーン静圧 風量と向き ゾーン底面静圧 送風機 差圧計 運転点		ガス濃度の分布 等濃度線					
状態値の時間変化									
	温度変化 PMV変化 熱負荷変化 発熱量変化	風量変化 ゾーン静圧変化 送風機風量変化 差圧の変化		ガス濃度変化 ガス除去量変化 ガス発生量変化					

図5 出力処理プログラム NETSOUT

SOUT 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況も確認できるようになっている。さらに市販の表計算ソフトでの分析を可能とするために CSV 出力も行うことができる。NETS は建築分野の問題検討に限らず、他分野でも使えるものと期待している。特に有限体積法により座標系に縛られず、工学的判断で近似化した実用モデルを作ることにより、手早く計算して検討したい場合には有用と思われる。また時間積分などの解法も無条件安定であり実用的でもある。是非試してみたいと思っており試用版も差し上げている。

## 8 多数室換気測定システム

熱回路網の理論的展開の中で導かれたシステム同定理論の応用として開発した多数室換気測定システムに関して紹介する。建築換気は、機械換気

だけでなく、内外温度差や外部風が原因となる隙間風や自然換気にも大きく影響される。従って空気流動を風速測定から直接的に測定することは難しく、トレーサースガスをを用いた換気測定が有用である。しかし従来の方法は単室扱いであり、複数室扱いのものは研究開発段階にある。従って従来の測定法には不十分な点が幾つか上げられる。単室扱いであって多数室扱いではないから室間の換気の径路が分からない。また室でのガスの混合容積は幾何的容積に等しいと仮定するので、滞留域等があった場合に誤差を生じる。つまり本来推定すべきパラメータは、換気風量だけでなく有効混合容積など複数ある。これに対して本システム同定理論は従来の測定法が持つこれらの問題を解決できる。測定システムは図6に示す。装置類はデンマークの既製品を利用した。コンピュータ制御により各室に断続的に SF<sub>6</sub>(六フッ化硫黄)を注入しガス濃度変化を作り出す。この変動するガス注入流量とガス濃度から SPID により、外気も含むゾーン間の風量、有効混合容積、ガス注入比率等

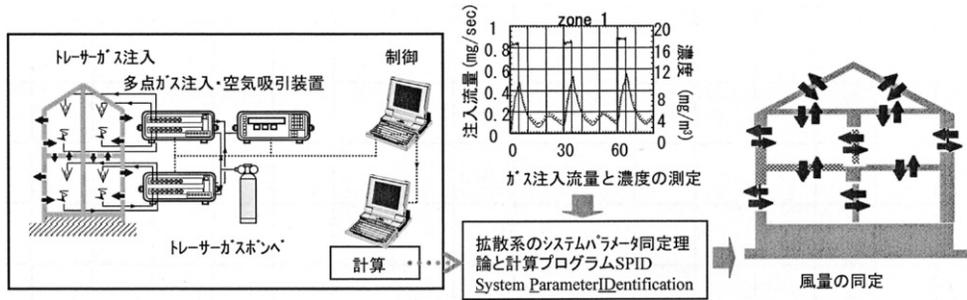


図6 システム同定理論の応用の多数室換気測定システム

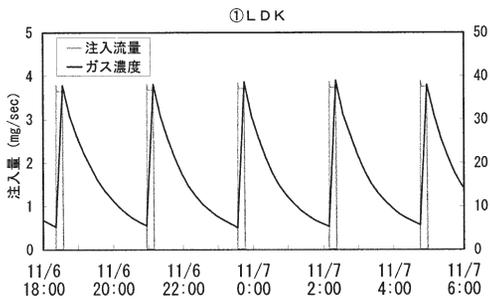


図7 室LDKでのガス注入流量と濃度の変化

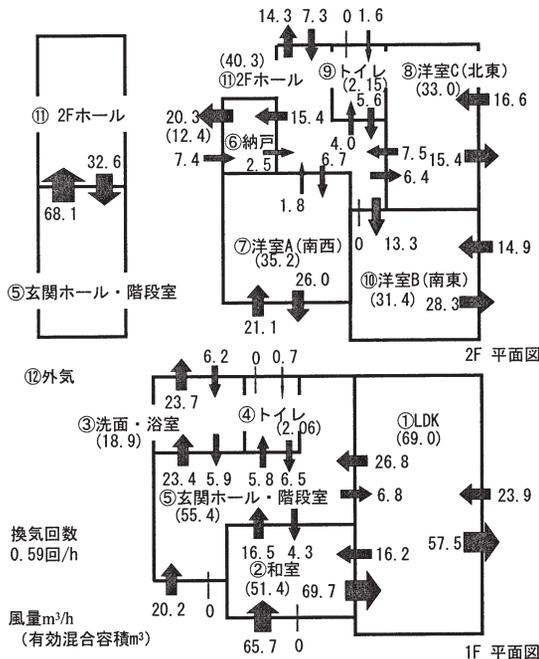


図8 風量と有効混合容積のシステム同定結果

の三種の拡散系のパラメータを推定する。測定事例を紹介する。シックハウスの換気対策技術開発関連で、つくばの(財)ベターリビングの敷地に建設された二階建て木造住宅で2001年11月に行っ

た測定法である。本測定時には第三種機械換気状態(給気ファンが無く排気ファンだけ)であった。ガス濃度変化の生成と測定は11月6日朝から11月12日朝まで行ったが、この中で11月6日18時から7日の6時まで12時間分の図7の測定データについてシステム同定を行った結果を図8に示す。この44個程度の風量であれば3時間ぐらいでシステム同定することが多いのであるが、有効混合容積と呼んでいる実質的な室の容積11個の同定も含め、同定すべき未知数が多いことから長めの12時間とした。なお同定誤差の評価は方程式残差を利用して統計的に行うことができる。本多数室換気測定法はハードウェアに関して開発課題が残されている。現状ではガス濃度分析計が1個で多数室のトレーサーガス濃度を計るために、各室から多点空気採取切替器までチューブを配置しておき、1分毎に吸引する室を切り替える。従って住宅規模でも数十メートルになるチューブを配置する手間が実用性を損ねる上に、本来は全室の同時的で連続的なガス濃度が必要なところを、何分かおきの測定値で直線補間近似することによる誤差などの欠点がある。そこでガス放出器と分析器を1つの箱にコンパクトにまとめたものを室数分用意し各室に分散して置く分散型のシステムに改良したいと考えている。

9 おわりに

建設工学を分解すれば、より基礎的な他の工学の寄せ集めであり、独自のものは無いと言われることがある。しかし良い建物は必ずしも良い材料

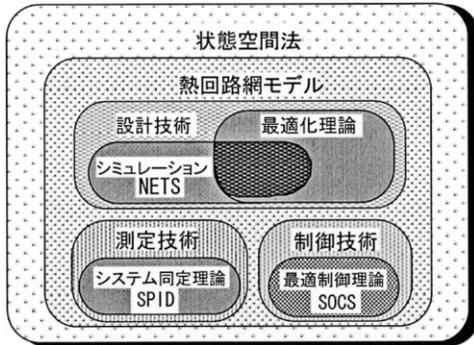


図9 理論体系

や部材を使えばできるものではなく、総合化の仕方のよし悪しにかかっている。つまり建設工学の一つの存在意義も最適総合化にあるかもしれない。従って計算モデル等も多元連立方程式的なシステムとしての挙動を検討できるものが有用ではないかと思う。理論体系は図9に示す様であるが残された課題は多い。伝熱や換気は様々な工学分野に共通する問題であるが、筆者の紹介するモデルが他の分野でも何かの参考になれば幸いである。なお他分野の方にもなるべく分かり易く述べたつもりであるが、紙幅の関係で不十分かもしれない、お許し願いたい。

#### 〈謝 辞〉

長年にわたり熱・換気回路網モデルに基づいて様々な理論展開と開発に携わる場を与えて頂いた清水建設に感謝するとともに、その過程でお世話になった、本文と参考文献では述べ尽くせなかった多くの方々にも感謝する。なお本稿をまとめるにあたり協力頂いた大西由哲氏にも感謝する。

#### 参考文献

[1] Pipes, L. A., Matrix Analysis of Heat Transfer Problems, Journal of Franklin Institute, Mar. 1957.  
 [2] Mitalas, G. P., and Stepenson, D. G., Room Thermal Response Factors, ASHRAE Transaction, Vol. 73, Part 1, 1967.  
 [3] Clarke, J. A., Prospects for Truly Integrated Building Performance Simulation, Sixth International IBPSA Conference (BS 99), Kyoto, Japan, September 1999, Vol. 3, 1147-1154.

[4] Sowell, Edward F., Haves, Philip, Numerical Performance of The Spark Graph-Theoretic Simulation Program, Sixth International IBPSA Conference (BS 99), Kyoto, Japan, September 1999, Vol. 1, 53-60.  
 [5] Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison : Modeling of Solar Heating and Air Conditioning, NSF/RANN/SE/GI/34029/PR/72/4, 1972.  
 [6] Tou, Julius T. (中村嘉平, 伊藤正美, 松尾勉訳), 現代制御理論(第3版), コロナ社, 1969.  
 [7] E. Feustel, Helmut, Dieris, Juergen, A Survey of Air Flow Models for Multi-zone Structures, Indoor Environment Program Applied Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA, Mar. 1991, LBL-30288, UC-350.  
 [8] Pryor, D. V., and Winn, C. Byron, A Sequential filter used for parameter estimation in a passive solar system, Solar Energy, Vol. 28, No. 1(1982), 65-73.  
 [9] 奥山博康, 一般拡散システムの回路網による状態方程式とそのシステムパラメータの同定理論(その2:有限要素法によるシステムパラメータの逆探問題への適用), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1984年10月, 657-658.  
 [10] Sinden, Frank, W., Multi-Chamber Theory of Air Infiltration, Building and Environment, Vol. 13(1978), Pergamon Press, 21-29.  
 [11] Etheridge, David, and Sandberg, Mats, Building Ventilation : Theory and Measurement, John Wiley & Sons Ltd., 1996.  
 [12] Okuyama, Hiroyasu, System Identification Theory of the Thermal Network Model and an Application for Multi-chamber Airflow Measurement, Building and Environment, Vol. 25, No. 4(1990), 349-363.  
 [13] Jensen, Lars, Determination of Flows and Volumes in Multiple Cell Systems, Paper to ROOMVENT-87, Report BKL 1987 : 3 (E), Lund Institute of Technology.  
 [14] Lawson, Charles L., and Hanson, Richard J., Solving Least Squares Problems, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1974, ISBN 0 89871 356 0 (pbk.).  
 [15] Okuyama, Hiroyasu, Recent Progress on the Multi-Chamber Airflow Measurement System, ISRAVCVE (International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness), July 1992, Tokyo, Japan, 351-356.  
 [16] Sawachi, Takao, Osawa, Haruki, Seto, Hironao, Taniguchi, Yoshinori, and Onishi, Shigeki, a New Experimental Approach for the Evaluation of Domestic Ventilation Systems, Part 1-Description of experimental Facilities and Their Application to the Quantification of Buoyancy-Driven Airflow in Two-Story Houses, ASHRAE Transactions, 1998 Part 1, 570-584.  
 [17] Owens, D. H., Multivariable and Optimal Systems, Academic Press, 1981, ISBN 0 12 531720 4.  
 [18] Okuyama, Hiroyasu, Optimization Theory for State and Energy Supply Based on a Heat and Moisture Transfer Network Model and Numerical Investigation, Proceedings of the 7th International

- Conference on Indoor Air Quality and Climate, volume(2), 1996, 485-490.
- [19] Okuyama, Hiroyasu, Thermal and Airflow Network Simulation Program NETS, Proceedings of the 6th International IBPSA Conference (Building Simulation '99), Kyoto, September 1999, 1237-1244.
- [20] 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.