

熱・換気回路網モデルによる 建築環境工学分野での研究開発

奥山 博康*

Research and development on the basis of the thermal and air flow network model for building environmental engineering field

Hiroyasu OKUYAMA*

1. はじめに

一般に研究の志向には分析型と統合型があるのではないだろうか。分析型は現象を分類し基本要因に還元して理解に努めるが、統合型は様々に異なって見える現象に共通して存在する原理を追求する。両者は車の両輪の如くどちらも不可欠である。基本要因の深い理解が無ければ要因間を貫く一般原理は得られないし、知見が一般化され統合化されなければ体系は煩雑になり次への発展は難しくなる。ここでは建築環境工学の分野で統合型のモデルによる展開を試みた例を紹介したい。

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、設備だけでなく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、総合的でシステム的な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、どのよう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空間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に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等を述べ、「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が、システム同定理論を、熱回路網モデルについて最小二乗法を用いて演繹したので、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。これは様々な測定法の不確かさ評価の改良にも役立つので「6.その他の測定データ分析技術」としても述べる。一方、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、ラグランジュ乗数法を適用し、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「7.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「8.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「9.多数室換気測定システム」を実施例

*教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

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工学会 (ASHRAE) によって 1970 年頃に提案され、日本もこれにならひ斯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。こうした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計算機能上の不十分さもある。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た展開はあまり進展しなかった。またシステム理論に基づく俯瞰的なモデルによれば、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グ的に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となっていった。例えば Clarke J.A.[3]や Edward F.Sowell[4]によるものもある。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する特徴がある。筆者の熱回路網モデルの考案は大学院の時代に太陽熱集熱器の計算から始まり、修士論文に向けて 1974 年頃に始まった。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 の(1)式に示すように、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。

表 1 基本方程式と記号表

熱流等の収支式 (完全連結システム の節点方程式)	$\sum_{j=1}^n m_{i,j} \cdot \dot{x}_j = \sum_{j=1}^{n+NO} c_{i,j} \cdot (x_j - x_i) + \sum_{j=1}^{ng} r_{i,j} \cdot g_j \quad (1)$
熱回路網の 状態方程式	$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{C}_0 \cdot \mathbf{x}_0 + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g} \quad (2)$
射影分解による 解析的時間積分 (NETSに含まれる)	$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i \cdot e^{a_i(t-t_0)} \cdot \mathbf{x}(t_0) + \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i \cdot e^{a_i(t-\tau)} \cdot \mathbf{f}^*(\tau) d\tau \quad (3)$
システムパラメータ 同定のための評価 関数 (SPID)	<p>回帰方程式誤差の二次形式の時間積分</p> $J_i = \int_0^T \mathbf{e} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{e} dt \quad (4)$ <p>を最小にするシステムパラメータを求める (システムパラメータとは、$m_{i,j}$、$c_{i,j}$、$r_{i,j}$ の三種の係数を意味する)</p>
最適制御のための 最適化の評価関数 (SOCS)	<p>状態値と入力ベクトルの目標との 偏差の二次形式</p> $J_c = \mathbf{'}(\mathbf{x}-\mathbf{r}) \cdot \mathbf{W}_x \cdot (\mathbf{x}-\mathbf{r}) + \mathbf{'(u}-\mathbf{d}) \cdot \mathbf{W}_c \cdot (\mathbf{u}-\mathbf{d}) \quad (5)$ <p>を最小にする状態と制御入力のベクトルを決定する</p>

記号表

n : 未知数扱い総節点数
 n_o : 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
 $P_{i,j}$: 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
 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$: 状態ベクトル
 $\mathbf{x}_o = (x_{n+1}, \dots, x_{n+n_o})$: 既知状態入力ベクトル
 $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_{n_g})$: 自由入力ベクトル
 \mathbf{M} : $m_{i,j}$ による容量マトリックス
 $[\mathbf{C}, \mathbf{C}_o]$: $C_{i,j}$ によるコンダクタンスマトリックス
 \mathbf{R} : $r_{i,j}$ による自由入力マトリックス
 α : $\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C}$ の固有値
 \mathbf{P} : 固有値 α に関する射影子
 $\mathbf{f}^* = \mathbf{M}^{-1} \cdot (\mathbf{C}_o \cdot \mathbf{x}_o + \mathbf{R} \cdot \mathbf{g})$ なる駆動ベクトル, 詳しくは[28]
 \mathbf{r} : 状態制御の目標値, 詳しくは[26]
 \mathbf{W} : 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} : 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} : 操作量の二次形式への重みマトリックス
 $\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a}$: 表される回帰式誤差, 詳しくは[18]
 \mathbf{W} : 一般化最小二乗法の重みマトリックス
 T : 測定期間

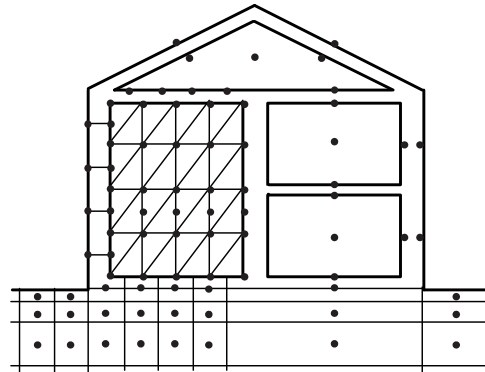


図1 異種離散化モデルの融合

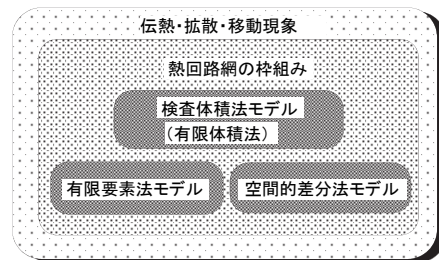


図2 熱回路網のプラットフォーム

当初はこの連立常微分方程式を時間に関しては後退差分で解いていたが、この近似的時間積分が無条件安定で実用的である理由は、推移マトリックスの固有値が0から1の間にあることにより説明されることが後になって分かった。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、状態空間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当時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の(3)式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1984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、状態空間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、状態空間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} 、そして自由入力係数 r_{ij} を介して互換性と融合性を持つようにした。

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乗に比例する場合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解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の係数をあまり必要としない反面、建物全体の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系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、計算安定性と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用住宅（パッシブソーラーハウス）の現場測定による熱的性能評価方法の試み[8]が参考になった。そこでは Sequential filter estimation と呼ばれる方法が用いられていたが、最小二乗法の本質を再考する参考になった。そして熱回路網の状態空間方程式モデルを、そのシステム・パラメータの一般化熱容量 m_{ij} 一般化熱コンダクタンス c_{ij} として自由入力係数 r_{ij} に関する回帰式に変形して、最小二乗法を自分なりに演繹し直し、表 1 の(4)式に示すような回帰式誤差の評価関数から、逐次同定と呼ぶ方法と一括同定と呼ぶ二つの方法を導いた。前者は前述の Sequential filter estimation に相当し、後者は推定すべきパラメータ総数分のサイズの所謂正規方程式の連立方程式を解く方法に相当する。一括同定では、ある程度の期間長さの離散時間的測定データ全体に関して一度にパラメータを推定する。これに対して逐次同定では離散時間的測定データの 1 ステップ毎に推定結果を得ていく漸化式を用いる。両者のシステム同定法の大きな違いは、逆行列計算のサイズと初期値の必要性の有無である。逐次同定の場合には状態空間方程式のサイズの逆行列計算ですむ。従って仮に 1 次であれば逆行列計算は単なる逆数の計算に帰着する。これは Matrix inversion lemma（逆行列補助定理）を適用しているからである。計算は軽いものになる反面、漸化式の初期値の仮定を必要とするので精度が悪い上に、測定値雑音の悪影響を受けやすく、実用には難があることは筆者の幾つかの数値実験[9]において確かめられている。漸化式の数式的導出過程は一見異なるものの、おそらくカルマンフィルターも本質的に本逐次同定と同じと思われるが、詳しい比較検討はしていない。この点では、一括同定を行う測定期間を移動平均的な意味で 1 ステップずつずらして行く方法の方が優れていると思われる。この熱回路網モデルは、一般的な拡散系の離散化モデルなので温度の拡散系だけでなくガスの流動系も表している。建

物の換気性能を検討する場合に、各室では空気汚染物質等が十分混合している Multi-chamber モデルで扱う。Frank W. Sinden による Multi-chamber theory[10]は、システム同定の観点まで達していなかったが、トレーサガスをを用いる換気測定法を検討したもので、拡散系の固有値の考察も含み、示唆に富むものであった。本システム同定理論の最初の実適用は多数室換気測定システムであった。これは 1979 年米国のスリーマイル島原発の事故が契機になった。さらに換気および隙間風の把握は、省エネとシックハウスや結露問題等の観点でも重要である。筆者は 1987 年から 1988 年にかけてスウェーデン王立工科大学の Tor-Göran Malmström 教授から招かれて、当時の国立建築研究所の Mats Sandberg 教授の換気実験施設[11]でその多数室換気測定システムの検証実験[12]を行った。そして同国滞在中に訪問したルンド大学の Lars Jensen 教授から、普通の最小二乗法では測定誤差等が大きな場合に、不合理な負の風量等が同定されるのではないかと指摘を受けた。彼は線形計画による方法[13]を研究していた。その指摘により、非負最小二乗法[14]を追加的に導入することにし、同定精度を向上させることができた。さらに 1989 年には第二世代のコンパクトな測定システムに改良[15]し、建築研究所の澤地孝男博士によるシリンドラーハウスと呼ばれる隙間風を正確に把握できる特殊な実験設備[16]で検証実験を行った。なお熱回路網モデルのシステム同定計算プログラムは SPID(System Parameter Identification)と呼んでいる。2001 年になってようやくこの kernel に対する入出力処理プログラムを開発する機会が得られた。

この熱回路網モデルのシステム同定理論を、多数室換気測定ではなく、本来の建築伝熱系で測定法として使えるようにするには、実は大きな問題が幾つか残されていた。多数室換気測定のトレーサガス拡散系では各室の小さなファンでガスを攪拌するので、モデルの各室ガス濃度の節点は 1 個で間に合う。しかし建築伝熱系では、室空気よりも壁体等の躯体の熱容量が大きいので、通常の室温変化予測計算のモデルには、離散化した躯体を受け持つ節点も必要になる。しかしこの比較的に多くの節点を持つ細かい予測計算モデルはシステム同定には適していない。なぜなら躯体中の節点に対応する部分を、理想的なモデルと同じ状況で加熱して温度を測定することは困難だからである。

そこで 2004 年頃に考えたのは、加熱の励振と測定が困難な躯体中の節点の変数は、励振と測定が可能な室空気の節点の変数の 2 階以上の時間微分変数により置き換えた回帰式を導き同定する方法[17]である。一般に元の状

態空間方程式が n 個の節点による高次な n 次であっても、1つの室温変数の n 階時間微分による n 個の変数を導入することで、一本の回帰式に帰着することも理想的には可能である。ただし回帰に有効な n 階微分値にするためには、少なくとも n 種類の周期と位相の正弦波から成る複合励振波形が必要と思われる。しかし実際上の諸々の測定誤差と外乱と対象系自体の時間変化も考えれば、有効な時間微分階数には限界がある。またこの方法は一般式にするのが困難であった。

2008年頃からシステム同定モデルは室温の節点だけの粗くて単純なモデルを用いる方向で計算機実験により模索し始めた。躯体の熱容量の影響は、室空気の相当熱容量を増やすことで考慮することにしたわけである。このために加熱の励振波形と測定データのフィルタリングには工夫が必要であった。

当初は矩形波の励振による1分程度の間隔毎のデータを用いていた。測定データを1時間程度の移動平均期間で平滑化すれば、同定結果は改善されたが、これは測定誤差はギザギザの様相を呈し、この悪影響が減少するからである。また矩形波よりも、ゆっくり滑らかに変化する正弦波が良い同定結果を与えることも分かった。節点数の少ない粗いモデルで実現象を追従できるのは励振が比較的長周期の正弦波の場合である。矩形波はフーリエ級数展開すれば高周波成分を持つことが分かるが、これらが粗いモデルのシステム同定には適さないと考えられた。

従って移動平均は、単なる測定誤差の悪影響軽減のための方法としてだけではなく、節点数の少ない粗いモデルに適した低周波数主体の測定データにするための方法としても必要である。つまり移動平均は、ローパス・フィルタとしても、測定データに必要な前処理であることが分かった。

初期のシステム同定理論は他の幾つかの点でも未だ不十分であった。これらも含め大幅に改良した理論を2012年出版の論文[18]に述べた。初期の理論では風量収支や熱コンダクタンスの対称性等の拘束条件を回帰式に考慮するために埋め込み方式をとっていたので融通性が十分ではなかった上に、同定するパラメータの非負性を考慮するための非負最小二乗法が十分に適用できなかった。そこで改良理論では、連立回帰式の行方向に拘束条件式を追加する形の定式化に改めた。これにより拡張性も良くなり、複数の熱コンダクタンスから熱伝導率等の基本的なパラメータへの回帰も容易になる。

また初期の理論でも不確かさ評価の根幹は既に造ってあったが、実際の計算による検討が不十分であった。推

定されたパラメータの不確かさ分散は、回帰式残差からのものと、測定不確かさ分散からのものと二通り計算されることは分かっていた。そこでこれらを利用して前者の後者に対する比率により、システム同定前提の不適合率と呼ぶ信頼性評価指標を定義した。実際の測定では、システム同定が前提とするモデルの線形性、時間的不変性、空間的一様性等が十分に成り立たないことにより生じる同定誤差が大きいのであるが、この評価が可能となる。

今後、前述の改良システム同定理論により、建築伝熱系に関する測定システムを試作して、実証的研究が必要と考えている。

6. その他の測定データ分析技術

本システム同定理論の要となる最小二乗法および不確かさ評価方法は回帰式が異なっても有効である。例えば簡易的な換気測定法として perfluorocarbon tracer gas(PFT)を用いる方法が研究されている。これは室内に置かれるドーザーと呼ばれる小瓶に入った物質からその揮発性ガスを数日間から数ヶ月にわたり放散し、同時並行して室内に置くサンプラーと呼ばれる小瓶に入った吸着物質にガスを吸着させ、測定期間終了後に放散量と吸着量を分析し、期間平均の放散流量と濃度を求め、期間平均の換気量を推定しようとするものである。この場合にガス収支式は定常状態のものを用いる。しかし実際には換気量変化によって濃度変動が起こるので、推定されるのは期間平均換気量とは少し異なる濃度重み付き平均換気量である[19]。また想定したゾーン分けの夫々でファン攪拌等も行わないし、ガス濃度が様であるかも不確かで、室温変化に影響されてガス発生が一定であるかも不確かである。つまり数式モデルの前提が十分に成り立つか保証が無い方法である。

ただし容易に推察できる様に、室数分の種類のガスを利用すれば、多数室換気測定法にも拡張可能である。

筆者は、ゾーン数以上のなるべく沢山のサンプラーとドーザーを設置することで、不確かさの評価をより正確にするだけでなく、風量の推定精度も向上する方法を考案した[19]。つまりそれまでは未知数の風量の個数に等しいガス収支式を得て決定論的に風量を求めているのに対し、より多くのガス収支式を回帰式として得て最小二乗法で推定するとともに、その残差を利用して不確かさ評価を行う方法を考えた。

一方、建物の気密性測定法の JIS[20]や ISO[21]のデータ分析法も改良できる[22]。従来の方法では推定パラメータの信頼区間が比較的広くて評価精度が良くなかつ

たが、回帰式の残差を利用する不確かさ分析法にすることで不確かさ評価がより正確になった。また筆者が考案したシステム同定前提の不適合率は、測定中の外乱等の悪影響も含め、再測定が必要か否かの判断に役立つ。

また単室モデルの換気回数をトレーサガスの濃度減衰により測定する ISO の方法[23]も改良できる[24]。換気回数の推定不確かさを最小にする最適減衰期間の決定法は、従来は経験的であったが、理論的根拠を持ち数学的に求める方法を演繹し、これによる最適減衰期間の選定数表を与えた。また換気回数の不確かさ評価の精度も向上させた。

さらに本システム同定理論の単室版とも言えるが、トレーサガスを正弦波で放出することにより、有効混合容積と換気風量に分けて測定する方法の可能性も明らかにした[24]。

なお他の分野でも様々な測定法とデータ分析法があるが、何らかの回帰式と拘束条件式を前提にした最小二乗法と見なせるものが多い様である。従って本論での不確かさ分析法により改良あるいは修正ができることが期待できる。

7. 状態とエネルギー供給の最適化理論

筆者の熱回路網の理論的展開にはシステム理論が大いに参考になったが、その状態空間法で展開されている最適制御理論そのものの応用ができたのは大分後になってからである。最適制御法の解式は連続的な積分方程式の形になっていることが多いので、実際の計算を行うためには、まず状態空間方程式を具体的かつ汎用的アルゴ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ュ乗数法を最小二乗法で解く方法[25]が有用である事が分かった。当初は非定常モデルで研究していた。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空間方程式モデルの固有値は実負であることが証明[28]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の(5)式に示ような評価関数から出発し、定常状態の最適解[26]を導いた。この評価関数の中身は、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を表す三項から成立させている。これらの項の数量的定義は、温冷感中立性が熱的中立状態にある人体の躯幹温度と 36.8°C の偏差の二乗であり、省エネ性が供給エネルギーとゼロの偏差の二乗であり、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/温水と外気温度の偏差の二乗である。これらの三つの偏差の二乗には、およそ対等の大きさになる様に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・屋根の様な躯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、熱源機器は高効率で使えるし、廃熱や太陽熱等も有効に利用できる。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、図3に示す様な計算機実験モデルを想定して理論の検証なども行った[26]。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、未だ入出力のユーザー・インターフェイスは開発していない。

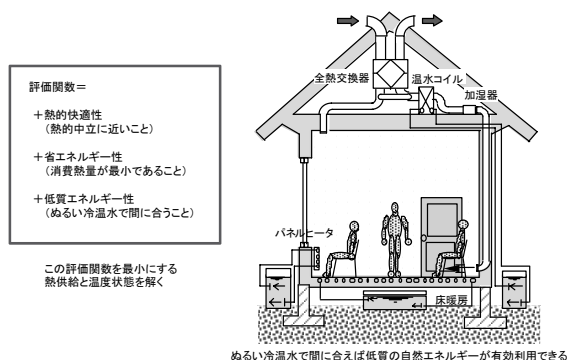


図3 状態とエネルギー供給の最適化の計算実験モデル

8. 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2000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である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[27]をすることができた。この開発の方向性は結果的に他の多くの技術計算プログラムとは逆になった。一般建築技術者向けよりも建築環境工学の専門技術者向けにし、適用先を特化するよりも汎用にし、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した。元来、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。一般の人には分かり難いかもしれないが、専門家には計算内容が把握できる。もちろん適用問題を特化して限定すればモデル作成は簡単にできるが、新規性のある研究的問題検討には対応できなくなる。NETSは図4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。現在のところ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、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5と図6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。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。これは状態空間方程式の濃縮とも呼んでいるが、振動解析の分野での技術を応用したものである。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。NETSOUT の計算結果表示は大別して、温度、ガス濃度、室内圧、風量、温冷感予測申告値 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。

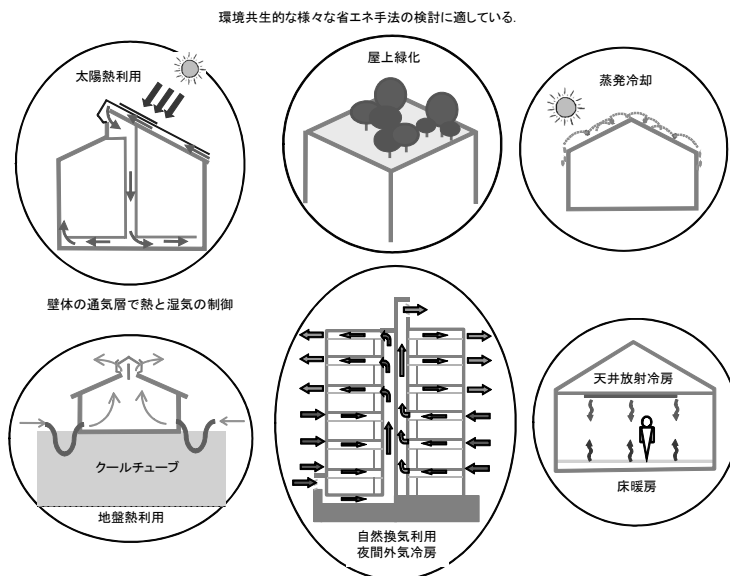


図4 エキスパート用ツール NETS の適用問題

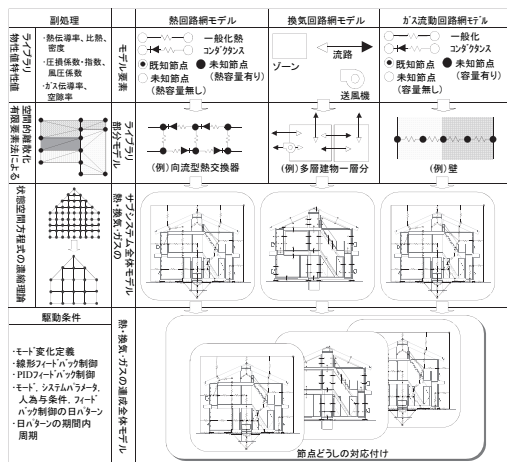


図5 入力処理プログラム NETSGEN

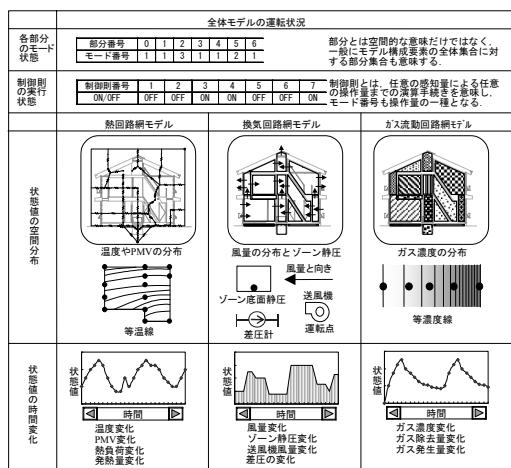


図6 出力処理プログラム NETSOUT

9. 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。二階建て住宅を例にとれば、冬季暖房常態では煙突効果で外気が一階に入り二階から抜けていく。一階で汚された空気が二階に流れるので二階の空気質が悪くなる可能性がある。従って室間の空気流動の実態を把握することは重要である。ただしこうした微風速の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、トレーサガスをを用いた換気測定法が必要である。従来の換気測定法は単室扱いであり、多数室モデルで空気流動経路を測定する方法は研究開発段階にある。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ことが行われていたもので、滞流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。

かつて開発した測定システムは図7に示す。装置類はデンマーク製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SF₆（六フッ化硫黄）を注入しガス濃度変化を作り出した。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、ガス注入比率等の三種の拡散系のパラメータを推定した。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）ベタリービングの敷地に建設された二階建て木造住宅で2001年11月に行った測定例である。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8の測定データについてシステム同定を行った結果を図9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。

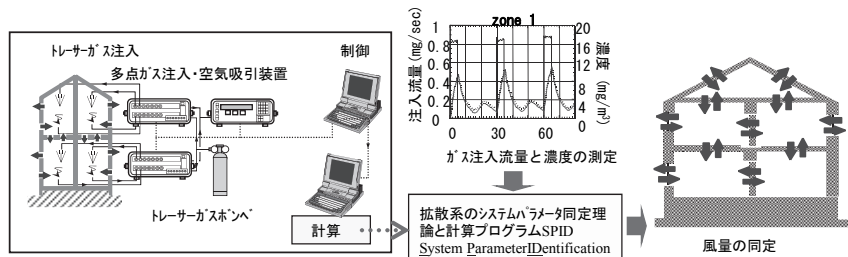


図7 システム同定理論の応用の多数室換気測定システム

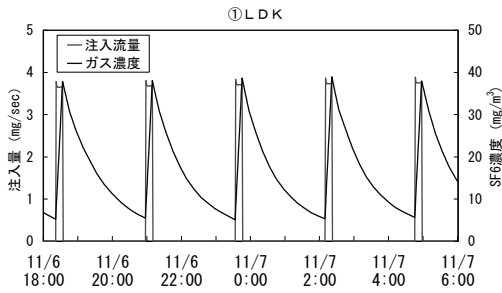


図8 室LDKでのガス注入流量と濃度の変化

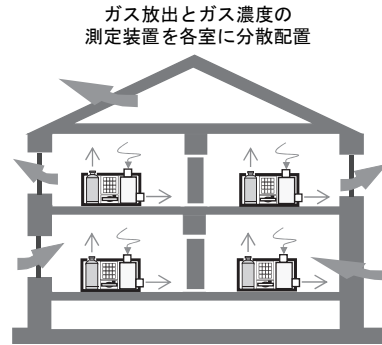


図10 多数室換気測定システムの改良

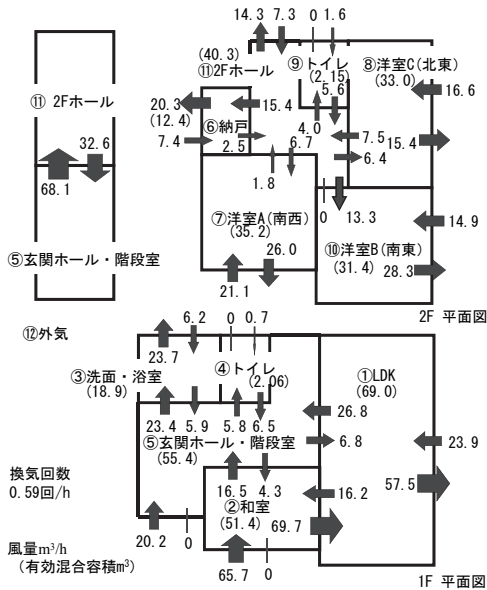


図9 風量と有効混合容積のシステム同定結果

10. 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、建設工学独自のものは無いと言われることがある。しかし良い建物と設備システムは必ずしも良い材料や部品や設備機器を使えばできるものではなく、これらの最適な組み合わせを考える建築計画と設計の良し悪しにかかっている。つまり最適な総合化の仕方が重要である。建設工学の一つの存在意義も最適総合化技術にあると言えるだろう。従って建築環境工学の計算モデル等も、原理的な現象を解明する分析的なモデルだけでなく、建物と設備の全体的でシステムの挙動を検討できる多元連立方程式的なモデルが重要ではないかと思う。この志向のモデルの一つとして熱・換気回路網モデルの概念による状態空間方程式モデルが上げられると思う。理論体系は図11に示すごとくであるが、残された理論課題と開発的な課題は多い。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ず、お許し願いたい。

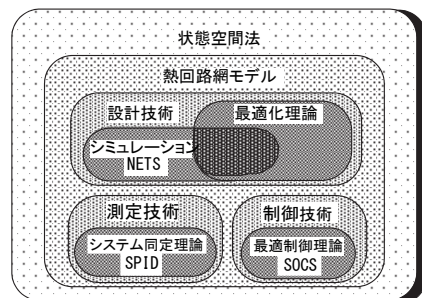


図11 理論体系

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。そこで図10に示す様に、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。

<謝辞>

この熱・換気回路網モデルに基づいた、さらなる研究と展開の場を与えて頂いた神奈川大学に感謝する。また当初研究の発想を与えて頂いた早稲田大学と、開発の場を与えて頂いた清水建設、そして委託研究等で開発の資源を与えて下さった旧通産省のハウスジャパン・プロジェクトと多くの企業、研究上の御教示と議論を頂いた学会や委員会の方々、さらにこの経緯でお世話になった、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。

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 Stephenson, 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 (BS99), Kyoto, Japan, September 1999, Vol. 3, pp. 1147-1154
- [4] Edward F. Sowell, Philip Haves, "Numerical Performance of The Spark Graph-Theoretic Simulation Program", Sixth International IBPSA Conference (BS99), Kyoto, Japan, September 1999, Vol. 1, pp. 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] Julius T. Tou, (翻訳) 中村嘉平, 伊藤正美, 松尾勉, "現代制御理論" コロナ社, 1969, 第3版
- [7] Helmut E. Feustel, Juergen Dieris, "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] D.V. Pryor and C. Byron Winn: "A Sequential filter used for parameter estimation in a passive solar system", Solar Energy Vol. 28, No. 1, 1982, pp. 65-73
- [9] 奥山博康, "一般拡散システムの回路網による状態空間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, pp. 657-658
- [10] Frank W. Sinden: "Multi-Chamber Theory of Air Infiltration", Building and Environment, Vol. 13, Pergamon Press 1978, pp. 21-29
- [11] David Etheridge, Mats Sandberg, "Building Ventilation: Theory and Measurement", John Wiley & Sons Ltd, 1996
- [12] Hiroyasu Okuyama, "System Identification Theory of the Thermal Network Model and an Application for Multi-chamber Airflow Measurement", Building and Environment, Vol. 25, No. 4, pp. 349-363, 1990
- [13] Lars Jensen, "Determination of Flows and Volumes in Multiple Cell Systems", Paper to ROOMVENT-87, Report BKL 1987:3(E), Lund Institute of Technology
- [14] Charles L. Lawson, Richard J. Hanson, "Solving Least Squares Problems", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1974, ISBN 0 89871 356 0 (pbk.)
- [15] Hiroyasu Okuyama, "Recent Progress on the Multi-Chamber Airflow Measurement System", ISRAVE (International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness), July 1992, Tokyo, Japan, pp. 351-356
- [16] Takao Sawachi, Haruki Osawa, Hironao Seto, Yoshinori Taniguchi and Shigeki Onishi: "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, pp. 570-584
- [17] 奥山博康, 熱回路網の原高次状態方程式モデルのシステムパラメータ同定を状態変数の高階微分による低次化方程式システムの観測から行う理論への展開, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, F-9, 2004年9月, pp. 437-440
- [18] Hiroyasu Okuyama, et al., "System parameter identification theory and uncertainty analysis methods for multi-zone building heat transfer and infiltration", Building and Environment, Elsevier, Volume 54, August 2012, Pages 39-52
- [19] Hiroyasu Okuyama, Yoshinori Onishi, Shin-ichi Tanabe, Seiichi Kashiwara, Statistical data analysis method for multi-zonal airflow measurement using multiple kinds of perfluorocarbon tracer gas, Building and Environment, Vol. 44, 2009, pp. 546-557
- [20] JIS A2201. Test method for performance of building airtightness by fan pressurization, Annex 3 (informative). Calculation of a , n and the confidence intervals. 1st ed; 2003-4-1
- [21] ISO 9972. Thermal performance of buildings - determination of air permeability of buildings - fan pressurization method, Annex C (informative). Recommended procedure for estimating uncertainty in derived quantities. 2nd ed; 2006-05-01.
- [22] Hiroyasu Okuyama, et al., "Reconsideration of parameter estimation and reliability evaluation methods for building airtightness measurement using fan pressurization", Building and Environment, Elsevier, Volume 47, January 2012, Pages 373-384
- [23] ISO 12569. Thermal performance of buildings - determination of air change in buildings - tracer gas dilution method, 6.1 calculation of air change rate, p. 8, Annex C (informative). Confidence intervals, pp. 14-15, annex D (informative). 1st ed.; November 2000. Propagation of error analysis, pp. 16-17.

- [24] Hiroyasu Okuyama, et al., "Uncertainty analysis and optimum concentration decay term for air exchange rate measurements: Estimation methods for effective volume and infiltration rate", Building and Environment, Elsevier, Volume 49, March 2012, Pages 182–192.
- [25] D.H.Owens, "Multivariable and Optimal Systems", Academic Press, 1981, ISBN 0 12 531720 4
- [26] Hiroyasu Okuyama, "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, pp485-490
- [27] Hiroyasu Okuyama, "Thermal and Airflow Network Simulation Program NETS" Proceedings of the 6th International IBPSA Conference (Building Simulation '99), Kyoto, September 1999, pp1237-1244
- [28] 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, 早稲田大学, 1987 年 12 月