

# 熱と空気の連成モデルを用いる建築熱環境設計

## Built Thermal Environmental Design

### Using a Combined Thermal and Air Flow Computer Simulation Model

奥山 博康  
Hiroyasu Okuyama

清水建設株式会社 技術研究所, 上席研究員, 工学博士  
(〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17, E-mail : [okuyama@shimz.co.jp](mailto:okuyama@shimz.co.jp))  
Institute of Technology Shimizu corporation, Chief Research Engineer, Dr. Eng

<Summary> This paper introduces a computer simulation program called NETS which has been developed to predict and design a building's thermal environment, heating and cooling system, air quality environment, water vapor condensation problems, stack effect of multistory buildings and green house effect, etc. The first section describes the author's intentions and awareness of issues regarding the development of NETS. Next, the mathematical model and spatial discretization method of NETS, simultaneous equation solving method, coupling method of heat, air and water vapor network models are described. Additionally, the meanings of the mode change and state feed back control are described. Following this, several modeling examples including a window surroundings model, detached house with a total heat recovery ventilation system model, and newly devised vertical temperature distribution for open spaces model are shown with diagrams. At the end of the paper, future research and development tasks are described.

熱回路網, 換気回路網, 伝熱と換気の連成, 温熱環境, 空気質環境, 計算機シミュレーション  
Thermal Network, Airflow Network, Thermal and Air Flow Coupling,  
Thermal Environment, Air Quality Environment, Computer Simulation

## 1. 問題意識と志向

技術者のレベルの低下さえ懸念される。

熱と換気の連成モデルを用いる建築環境設計という主題であるが、本論ではこれだけでなく一般に計算機シミュレーション技術に関して日頃感じている問題意識と背景となる研究開発志向を対比的に述べ、次に熱・換気回路網計算プログラム NETS の概要、実施例の紹介、そして今後の課題等も述べてみたい。

### 1.3 職業用ツールと教材用ツール

職業用のシミュレーションツールのひとつの要件は仕事を効率的にすることなので、入力の手間が少なくてすむことを目指せば、結果的に計算プログラムの内容がブラックボックス化してくる傾向があることは否めない。

一方、教材用のツールとして考えれば、CG 的なうわべの描画ではなく、本質的计算モデルと計算内容がよく見えて、直にいじれる方がよい。従来のツールは当然の様に職業用をめざし、研究・教材用にもなること等は考えられてこなかったと思われる。

例えば NETS では、その熱回路網モデル図自体が、計算対象物を空間的に分割した部分の其々で成立つ熱流収支式が連立方程式として連成している状況を明示している。こうした空間的な離散化とモデル図描画はユーザーにより自在に行えるから、伝熱の仕組のモデル化を理解し、モデル化の妥当性を試すこともできるので、教材には適していると言える。

### 1.1 設計用ツールかプレゼンツールか

従来の熱環境シミュレーションは、基本設計終了後にプレゼンテーション資料作成用に行われるというのが実態ではないだろうか。そこで真に設計の初期段階から最終段階までの広い過程で役に立つ実用的なシミュレーションプログラムも必要なのではないだろうか。初動の設計段階では、十数分間で作れる少ない節点数のモデルの計算もでき、さらに設計過程が進んで具体化してくれば、数時間から数日かけて構築する大きな節点数のモデルでも計算できれば有用ではないかと思われる。

### 1.4 汎用ツールと特化ツール

例えば単一機能に特化したツールは使いやすいが、多機能なツールは使い難い場合が多い。また汎用的なツールほど、使用方法を自らイメージしたり工夫したりしなければならぬ難しさが生じる。そして新しい問題を検討しようとする場合には、汎用的なツールにより新たなモデルを工夫する必要があるため、汎用性は研究開発用ツールには必須の要件と言えよう。

### 1.2 専門家用ツールか一般用ツールか

本来望ましいのは計算理論をよく理解している専門家がシミュレーションを行うことである。しかし計算モデルも既製の構造を組み込み、入力情報も幾何的情報や材料名情報だけで済むようにすれば、計算内容を理解していない人でも一応の計算結果が出せるようになる。これは良い面もあるが、反面 適切な条件設定と計算結果かどうか判断できないという問題が起こる。またこうなれば、

## 1.5 分析志向と総合化志向

伝熱計算の基本原理は、温度差に比例して熱流が生じ、温度上昇率は熱容量に反比例するという簡単なものである。この様に還元された基本現象は簡単であるが、例えば自然室温の予測計算となると、多くの方位の壁体と室空気の熱流、多数室間の空気流動など、多くの部分が熱的に連成したモデルを計算しなければならず簡単な問題ではなくなってくる。もし単純な一本の一次方程式の問題であれば簡単に解けるが、これが連立方程式的な問題になってくれば、連立方程式を組み上げることも解くこともコンピュータを使わなければ困難になる。

理学的に明らかな原理に則った予測計算などで新たに発見できることは何も無いと言う還元主義的で分析主義的な学者もいる。しかし地球温暖化の予測計算の問題も同様であると思うが、その問題の規模が大きい連立方程式的システム故に予測が困難な場合には、その予測技術の研究として取り組む価値はあると言えよう。建築分野の多くの問題も最適総合化の過程にあると思われる。

## 1.6 古典的制御理論と現代制御理論

制御理論は様々な工学分野で思想的な背景になっている様に思われる。また制御理論は古典理論と現代理論に大別される場合もあるようで、これら二つは具体的には伝達関数法と状態空間法に対応する様である。伝達関数法は単一の入力変数と単一の出力変数の間の時系列的な関数を論じ、状態空間法は多変数の入力値と状態値および出力値の間を連立微分方程式的な関数で論じる。

伝達関数法は手計算で扱うことも可能であるが、状態空間法は連立方程式で扱わねばならず、コンピュータ計算が必要になる。コンピュータ技術の発達に従って状態空間法が発展していくのは自然な成り行きであろう。

しかしなぜか初期のコンピュータ利用熱負荷計算の原理に使われたのは、伝達関数法の流れをくむと思われる壁体の時系列熱流応答係数法<sup>[1][2]</sup>であった。当時でも壁体伝熱の差分法計算は行われていたが、陽解法の時間積分が使われていたので、計算時間がかかる上に、数値計算的な不安定性の問題があったと思われる。実は進化の枝分かれでは、この差分法の系統の発展の先に、状態空間法的な数学モデルの扱い方と、安定で厳密な時間積分法の進化があったと考えられる。

現在でも熱流応答係数法は標準的に使われている。そしてこのことが建築伝熱モデルに多くの制約を課していると考えられる。比較的熱容量の大きな壁体であれば時系列応答係数は求められるが、ガラス窓の様に熱容量が小さければ応答係数は求め難く、従って窓には定常の熱貫流モデルを適用せざるを得なくなる。窓は熱貫流モデルなので、ガラスやブラインドの温度を計算せず窓からの熱取得を計算することになる。そこで日射遮蔽係数という曖昧な係数を導入せざるを得なくなる。外皮の法線方向の一次元熱流しか扱えないから、窓に通気層があ

って排熱するような工夫も適切にモデル化できない。

さらに伝達関数モデルでは、系の構造やパラメータが時間変化したり、温度に依存して変化する非線形性を扱うことは困難である。

## 1.7 現象の深い共通原理で一般モデルとするか

### 外面の違いで場合分けモデルとするか

計算プログラムを作る際に、適用問題と条件を想定して場合分けをし、其々の処理プログラムを並列的に用意することは即物的で分かり易く開発もしやすい反面、計算プログラムが膨大になる上に、想定以外には使えず汎用性が乏しくなると言う問題が生じる。

例えば伝熱形態には、伝導、表面对流伝達、長波長放射伝達、移流など様々あるが、もし熱流収支式においてこれらの場合分けして別々の記号を用いれば、計算式もプログラムも複雑になる。しかし全ての伝熱形態をひとつの一般化熱コンダクタンス  $c_{ij}$  という記号で表わせれば熱収支式もひとつですみ計算プログラムも簡単になる。

また伝熱現象を空間次元で、一次元伝熱、二次元伝熱、三次元伝熱と場合分けすれば、対応して計算プログラムも場合分けされ大きくなる。しかし完全連結システムの節点方程式を定義することで、計算対象の空間次元にも形状にも関係なく常に成立する式になり、計算プログラムも簡潔でありながら汎用にすることができる。

## 1.8 CFDの熱環境シミュレーションと

### マクロモデルの熱負荷シミュレーション

近年ではCFDが発達し、計算結果の視覚な分かり易さも相まって、熱環境シミュレーションと言えばCFDによる室内気流と温度分布計算を行うイメージが広がっている。しかし多数室モデルをCFDで計算したという適用例を見ると壁体内伝熱は熱容量を無視した定常モデルであったり未知数とすべき境界条件を与えていたり伝熱現象を計算する期間も非定常の熱負荷の検討には不十分な短い期間だったりする。またダクト抵抗と送風機P-Q特性に依存して風量に変化する冷暖房換気システムモデルも連成した総合的モデルで解くのは難しい様である。

一方初期の建築伝熱計算の主目的は熱負荷計算であった。多層材料の壁体1次元非定常伝熱計算が重大関心事で、熱流応答係数法が標準となったわけである。しかしこちらのモデルでは室空間内は温度が一樣に混合した仮定が用いられていることが多く、乏しい壁体断熱、隙間風と内部発熱の大きい建物で生じやすい上下温度分布などが考慮できない問題がある。

こうして熱環境シミュレーションのイメージは、昔の壁体非定常伝熱計算に偏重したモデルから、室内空間の気流分布へ偏重したモデルにシフトしているが、両者は両極端であり一方は他方の重点が十分考慮されていないという不十分な現状にあると考えられる。

熱環境シミュレーションは、熱負荷計算シミュレーシ

ョンおよび設備機器システムシミュレーションも包含するものに進化していくために、其々の欠点を相補う工学モデルの研究開発が必要であろう。

## 2. 計算プログラム NETS の概要

前章で述べたような問題意識と志向の中で研究開発と適用を進めてきた熱・換気回路網計算プログラム NETS であるが、特に題目としている多数室換気計算と伝熱計算の連成モデル化の方法を中心に、概要を述べたい。

### 2.1 数学モデルと離散化法

熱回路網モデルについては、空間的離散化は有限体積法と有限要素法などの任意の方法で行なえる様になっている。これらで結局得られる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  $c_{ij}$ 、熱流入力係数  $r_{ij}$  により構成される完全連結システムの節点方程式は、空間次元や計算対象の形状によらず一般に成立する。また異なった空間離散化法によるシステムパラメータでも互換性があるので、異なった離散化法による部分があっても一体化されて全体の連立常微分方程式が構成される。この連立常微分方程式は制御理論の状態空間法にならって状態方程式とも呼んでいる。水蒸気などのガス状物質の拡散も熱回路網と同様な数学モデルで表現し扱える。

換気回路網モデルを構成する要素はゾーンと流路そして送風機等である。解くべき未知数はゾーン底面での全圧と各流路の風量である。そこで換気回路網は全圧節点系と呼ぶこともある。

### 2.2 熱回路網と換気回路網の解法

熱回路網の連立常微分方程式の時間積分法には無条件計算安定で実用的に優れている後退時間差分を用いることが殆どであるが、実は固有値解析に基づき射影分解による解析解と呼ぶ厳密解法もある。また大きな節点数の場合に備えて連立常微分方程式を自動的にサブデバインドし、より低次数の連立常微分方程式にした上で、これらを陽解法的時間差分で連成する解法も内蔵している。解法は水蒸気回路網でも同様である。

換気回路網の解法は圧力仮定法に属する。自然換気も機械換気の駆動力も働かない状態では自明の静圧の分布を持つ。これらを初期値にして各ゾーンでの風量収支が成立つ様に、連立したニュートンラプソン法によりゾーン圧力に修正を加え収束計算する。各ゾーンでの風量収支残差のゾーン圧力によるヤコビアンマトリックスの逆行列を用いて圧力修正量を計算する。ただし普通のニュートンラプソン法では振動を起こす問題が生じやすい仕組みを明らかにし、安定で迅速に解に到達するように、実際に修正を施すのはこの半分とする。そこでこの解法を修正ニュートンラプソン法と呼んでいる。

### 2.3 熱回路網と換気回路網と水蒸気回路網の連成法

例えば工場の温度差換気を考えれば明らかなように、伝熱と空気流動と水蒸気流動は相互影響する。この相互影響の計算モデルでの扱いは、換気回路網からは風量が算出され、これが一般化熱コンダクタンスとして熱回路網に与えられて室温などが解かれ、この室温により空気の密度が計算され換気回路網へ与えられる、というお互いの結果のやり取りで為される。

また蒸発冷却は、水蒸気回路網と熱回路網の相互影響として計算される。水表面の温度に対応する飽和絶対湿度と外気絶対湿度の差に物質移動係数を乗じて蒸発量が計算されれば蒸発冷却量が求められる。これが熱回路網に与えられれば水表面での温度が解かれる。

むしろ重要な問題は、こうした相互影響で連成する仕組を汎用モデルとしてどのように構築するかである。三者のモデルは節点系のモデルとして見なせる。ただし三者の節点系には図1の集合論的な包含関係が存在する。熱回路網の節点の一部には水蒸気を透過しない金属の様な部分を表わす節点もある。さらに木材の節点の様に水蒸気を透過しても空気が透過しないものもある。こうしたことから換気回路網は水蒸気回路網に包含され、さらに水蒸気回路網は熱回路網に包含される関係にある。

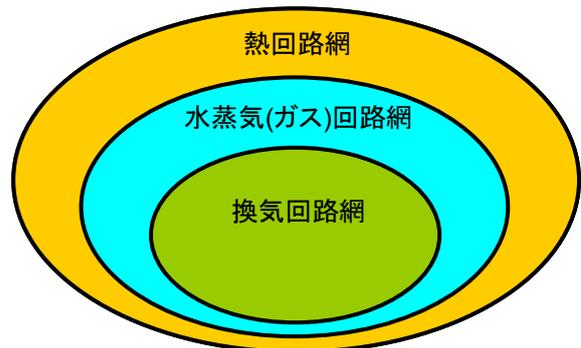


図1 三種の節点系モデルの包含関係

こうした節点番号の対応付けの NETS での様子を図2に示す。この画面の計算対象物は NETS 使用方法の説明によく用いる例題で、簡単なながらも様々な伝熱形態を持ち、重要な温室効果と煙突効果のモデル化も含む空気式太陽熱集熱器の例である。左のモデル図は換気回路網で、右は熱回路網である。集熱器の通気層では煙突効果で空気が流動するので、これが換気モデルの唯一のゾーンと見なす。このゾーンをクリックして赤色に反転させ、次に右の熱回路網の通気層の節点をクリックして、節点の対応付けがなされる。こうした対応付けは、両者のモデルを、一方が背景となり透けて見える重なり合ったモデル図の画面で行なう方法を選ぶこともできる。

節点の対応データができれば、風量から一般化熱コンダクタンスへの変換、空気温度から密度への変換等が行なわれて、熱と換気のモデルの相互影響が計算される。

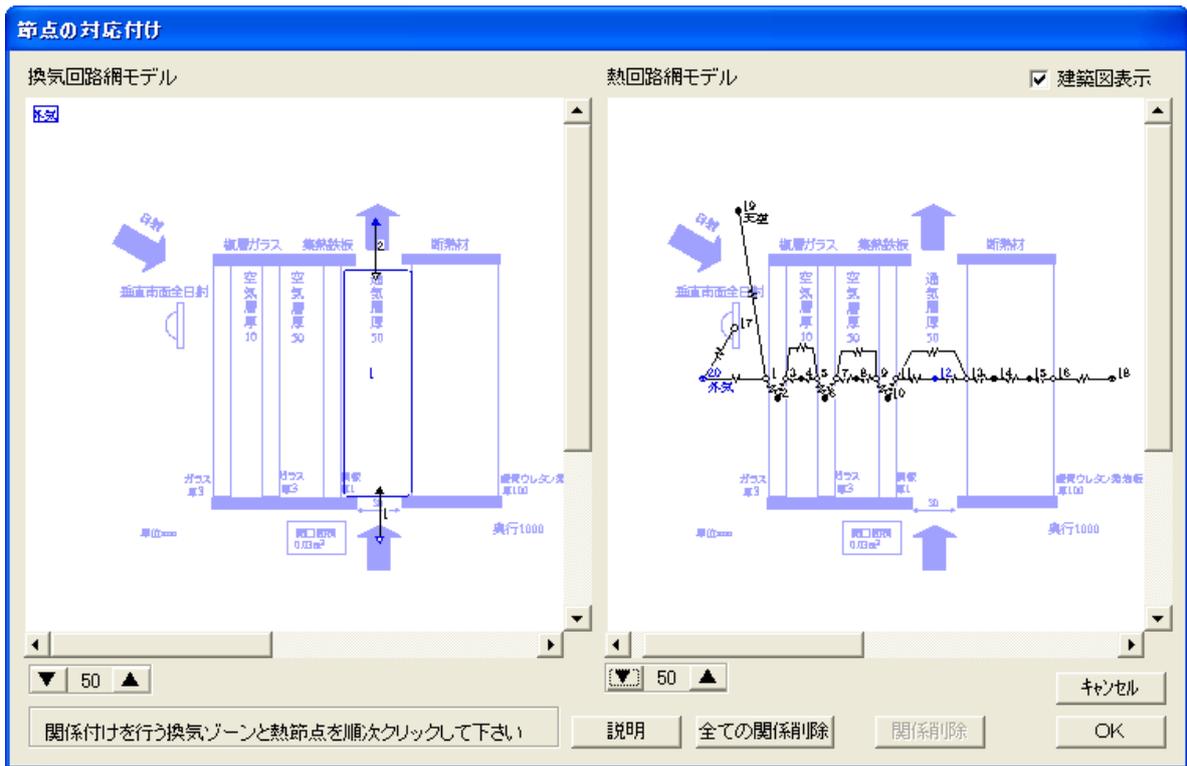


図2 熱回路網と換気回路網の節点对応付け

この連成は、非定常計算であれば時間積分間隔 $\Delta t$ 毎にとられ、定常計算のための収束計算では繰り返しステップ毎に行われる。なお NETS での計算時間間隔 $\Delta t$ は最小1秒から最大1時間までとることができる。

#### 2.4 モード変化と状態フィードバック制御など

例えば自然換気を利用する際には、屋内外の条件に応じて窓や換気口を開閉しなければ適切な室内環境は保てない。夏季であれば、朝夕の外気温が低い状況では窓や換気口を開け、日中外気温が上がれば窓は閉めて冷房したりする。窓のブラインド等の日射遮蔽装置も、日射量や何らかの温度により操作されるのが普通である。

年間熱負荷計算においても、その結果が実態に近くなる様に、計算モデル自体がこうした変化を考慮できるものでなければならない。

こうした変化を NETS ではモード変化あるいは状態フィードバック制御等と呼んで、一般的に自由な設定で行なうことができる。

モード変化とは、計算モデルの構造や様々なパラメータが変化することを言う。モード変化はスケジュールでも状態フィードバックで行なうこともできる。まずモード変化チャート表と呼ぶものを定義する。最初に作ったモデル構造とパラメータ集合を基本モデルと基本モードと定義し、これから構造やパラメータが変化したモデルは派生モデルと派生モードと言う。チャート表で、定義した派生モードの欄をクリックすれば、基本モデルからそのモデルに変更する画面になる。モードの変化はモデルの部分番号とモード番号で管理される。

状態フィードバック制御では、制御則を予め作っておき、これをスケジュールまたは状態フィードバックで実行する。制御則とは、任意の状態量からユーザー定義の演算則によって感知量を算出し、これによる場合分けをし、さらにユーザー定義の操作量演算手続きによって操作量を算出して、モデルに施す手続きを言う。操作量にはモード番号も含まれる。状態量には一次的な計算結果である温度、絶対湿度、ガス濃度、室内圧の他に、相対湿度、エンタルピ、PMVなどが含まれる。

熱負荷計算もフィードバック制御の一種として行われる。目標の温湿度を一定に維持するために必要な顕熱と潜熱負荷の計算の際には、冷暖房装置容量を与えることにより、冷暖房開始直後などで、装置容量を超える時には、過渡状態の自然温湿度が計算される。この熱負荷計算では同じ室の空気節点の温度が制御量であり操作量を受ける。同様な熱負荷計算でも、異なる節点が制御量を持ち操作量を受けるモデルも作れる。この場合はPID制御を行うことが多い。例えば冷暖房コイルへの戻り空気温度でコイルでの除去熱量を制御する場合などである。

PID制御を行うためには、予め操作量の励振による制御量の応答の時間変化を短い期間で計算し、これから比例動作、積分動作、微分動作への係数を求めておく。

氷蓄熱や相変化物質における相変化も、NETSではこのモード変化のフィードバック制御により模擬することができる。相変化の遷移状態とする温度範囲を仮定し、該当節点の温度がこの中に入れば節点の熱容量を大きくするモード変化をさせるのである。



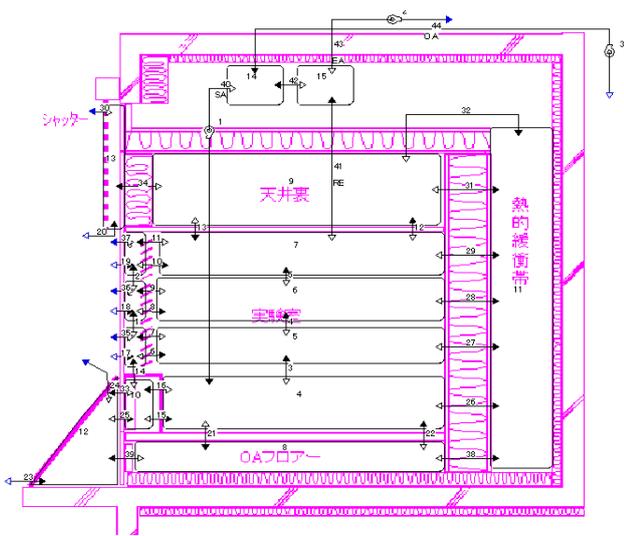


図7 換気回路網モデル

### 3.3 戸建住宅の全熱回収器の省エネ効果検討モデル

全熱回収器は寒冷な欧米で顕著な省エネ効果があるとされ、日本でも普及しようとしている。そこで温暖または蒸暑気候の日本でも顕著な省エネ効果があるのかを検討するモデルを作った<sup>[4]</sup>。夏季の冷房時でも、冷房されないゾーンは高温になり、換気の排気には高温の空気が混じるから、熱回収器による導入外気が加熱・加湿され逆効果を生じる可能性がある。この現象は多数室モデルで非空調ゾーンも含めた建物全体のシステムで検討する必要がある。

図8は事例の建物平面図と換気設備図を示す。

この多数室系でダクトと送風機および全熱回収器からなる換気モデルを図9に示す。全圧節点系の考え方によりダクト系も包括的にモデル化できる。また熱交換メディアの漏気を考慮し実態に近づけるため、送風機は固定風量ではなくP-Q特性依存モデルとする。送風機と煙突効果等による室内圧のリアルな再現を行い、廊下等を経由した室間空気流動を模擬するために、建物外皮の隙間も流路でモデル化する。

図10は熱回路網である。壁体伝熱は有限要素法によりモデル化し、部品として登録でき、引用して全体モデル構成を容易にできる。また必要に応じて箱状に縮小表示しモデル図を見やすくできる。図中の破線は節点やゾーンの同一化を表わし、モデル図表示を分かりやすくする工夫である。水蒸気回路網は熱回路網の部分集合に対応し節点数も少ない場合が多いが、本建物に関するモデル図は紙幅の関係で省略する。熱水分同時移動の水蒸気吸着率 $\kappa$ と放出率 $\nu$ は一定値扱いの連成モデルである。このモデルでも実態の生活に近く窓の開閉を2.4で述べたモード変化機能により模擬するようにしている。

### 3.4 空間の上下温度分布生成の工学モデル考案

室内の発熱と周壁の冷氣下降などにより、室内空間には著しい上下温度分布が生じることがある。この際の水平方向の温度分布はほぼ一様であることも知られている。長期間の熱負荷計算モデルでも適用するには、実用的な工学モデルが必要なので空衛学会委員会活動では伝熱モデルだけの上下温度分布モデルが提案されている<sup>[5]</sup>。

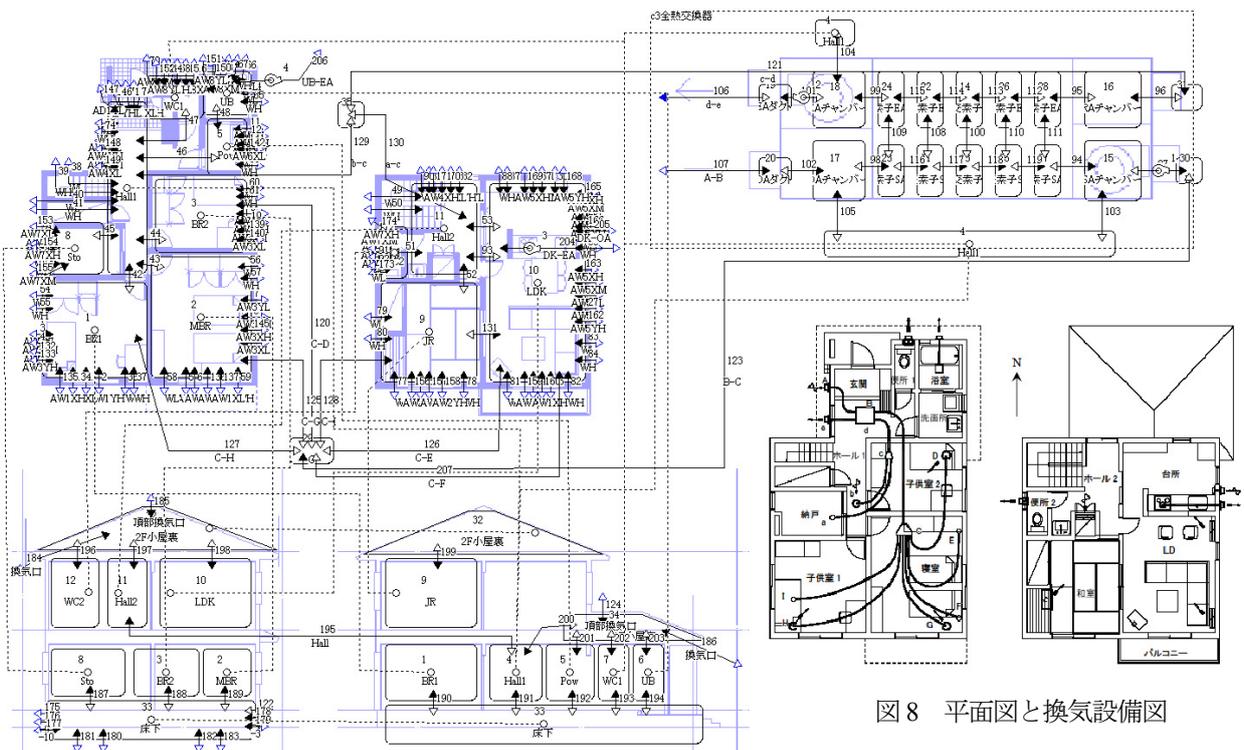


図8 平面図と換気設備図

図9 換気回路網モデル

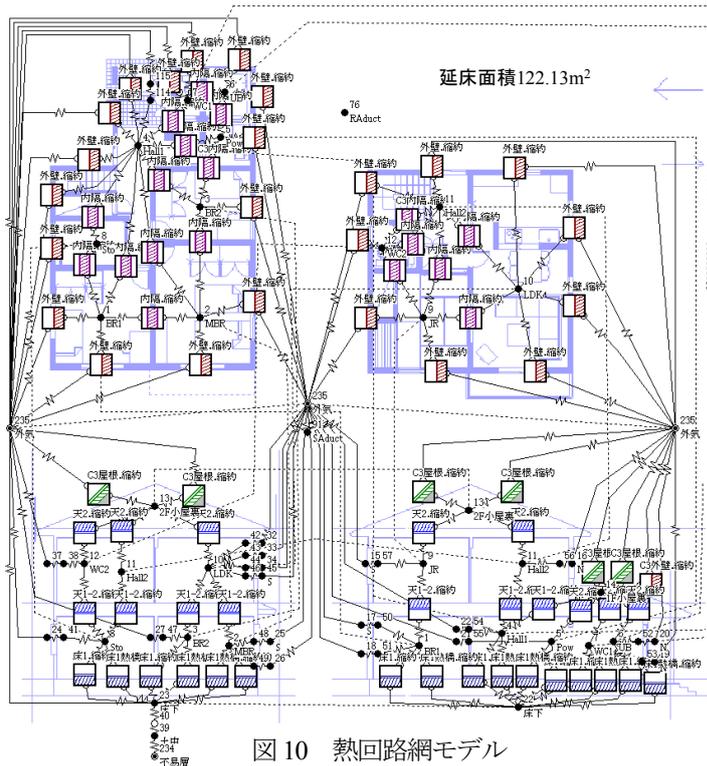


図10 熱回路網モデル

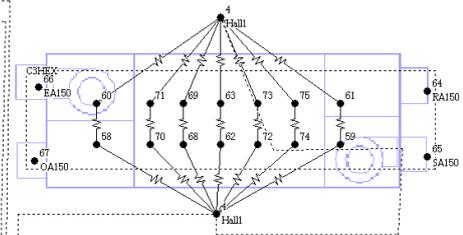


表1 壁仕様(次世代省エネ基準相当の断熱仕様)

部位	層構成(室内側より。カッ内は厚さ[mm])	断熱材の熱抵抗値
外壁	石膏ボード(12)+ウレタン発泡断熱材(48)	1.7[m²K/W]
内壁・隔壁	石膏ボード(12)+非密閉中空層+石膏ボード(12)	-
天井(1Fと2Fの間)	石膏ボード(12)+非密閉中空層+合板(25) (1F側からの層構成を示す)	-
天井(上部は小屋裏)	石膏ボード(12)+ウレタン発泡断熱材(112)	4.0[m²K/W]
床(1Fの床)	合板(15)+ウレタン発泡断熱材(70)	2.5[m²K/W]
屋根	合板(25)+アスファルト類(2)+石膏スレート(7)	-

表2 部分とモード変化のチャート表

部分番号	1	2	3	4	5
モード番号	和室窓	子供室窓	寝室窓	LDK窓	全熱交換器
1	閉	閉	閉	閉	運転
2	閉	閉	閉	閉	SAファン停止
3	-	就寝時の閉	清掃時の閉	清掃時の閉	-
4	-	-	就寝時の閉	就寝時の閉	-

通風に関しては、冷房期間は外気温度が16~25℃の時、暖房期間では18~26℃時に窓を開け通風をとる。

しかし筆者等は熱回路網だけでなく、換気回路網モデルも連成して新たな上下温度分布生成モデルを考案した<sup>6)</sup>。この仕組みを図11に示す。日射等による発熱体から熱プルームと呼ぶ上昇流が生じる。一方、比較的低い温度の外皮の内表面では下降流が生じる。これらは温度に依存した空気密度によって生じる流れである。

温度成層化ゾーンの層間には混合流による一般化熱コンダクタンスが存在し、この大きさは室空間に強制対流があれば大きく、逆に静穏であれば小さいと考えられる。

この混合流の一般化熱コンダクタンスと、密度流の圧力損失係数が主な未定パラメータとなる。これらのパラメータは、今のところ実測の温度をよく再現する様に、評価関数を定めた上で最適化されなければならない。既に幾つか事例計算も行った。しかし案外に普遍的に適用できる特性値になるのではないかと考えている。

#### 4. 今後の課題

このNETSの延長で今後の課題を述べておきたい。

##### 4.1 インターネット上のモデル共有システム

様々な問題を検討するための工学モデルを考案すること自体が実は研究課題である場合が多い。そこで既往の工学モデル化の知見は有用である。またNETSのモデルは一般性により互換性のある標準的モデルとなり得る。そこで全体的モデルだけではなく、モデルの主要部分、部品、物性値、特性値をインターネット上のサーバーに蓄積し共有する図12の様な自己成長型の利用システムを構築し全国研究機関間で試験運用を行う開発資源と有志とを募りたいと思っている。

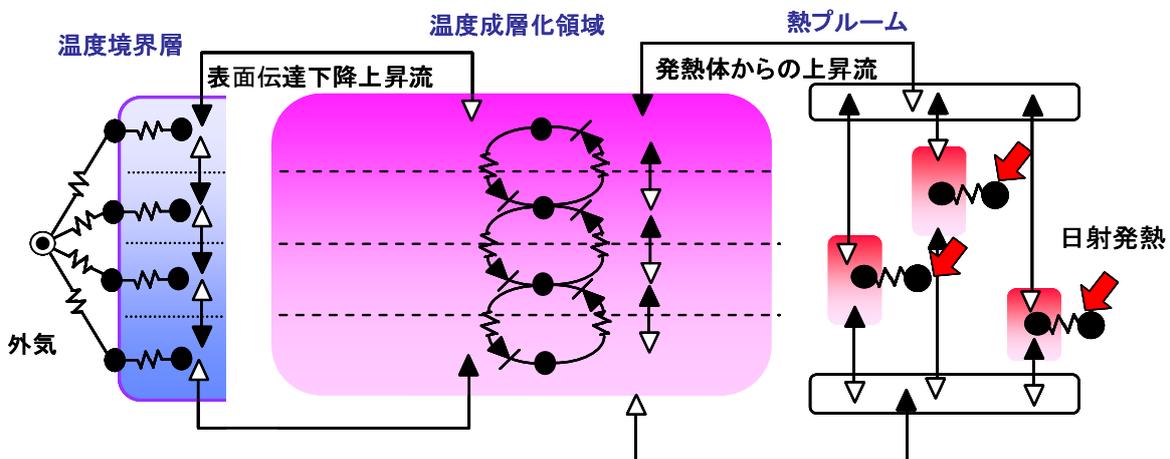


図11 空間の上下温度分布生成モデル

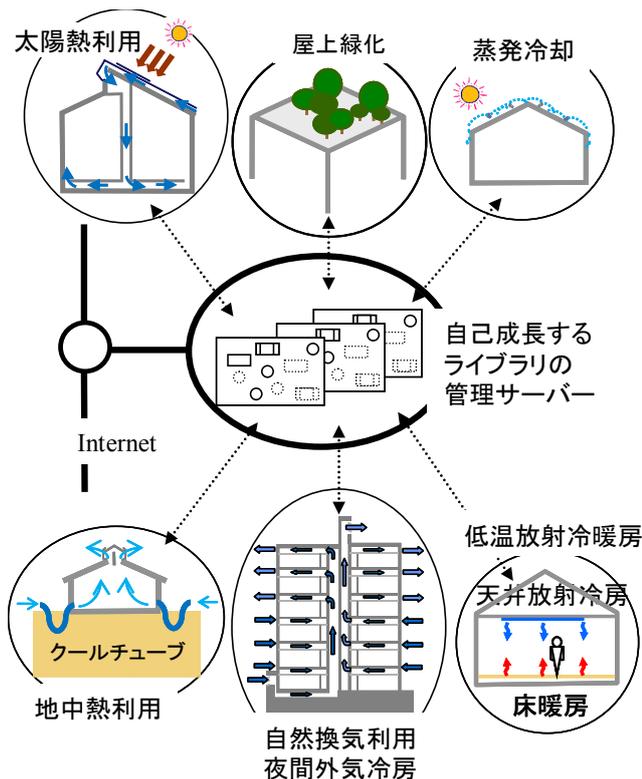


図12 インターネット上のモデルライブラリ共有システム

#### 4.2 ミクロからマクロへの自動的モデル化

有限体積法により比較的マクロなモデル化ができるが、有限要素法や差分法はミクロなモデルと考えられる。しかし両者は前述した様な完全連結システムの節点方程式によれば本質は同じ数式モデルと見なせる。そしてミクロモデルの連立常微分方程式は、数学的濃縮法<sup>[7]</sup>により自動的に次数が低くて計算し易い連立常微分方程式にすることができる。これにより例えばCADからオートメッシュで生成された3次元壁体モデルも自動的に1次元モデルに縮約できる。

#### 4.3 マクロとミクロのモデルの連成方法

伝熱モデルに関しては前節で述べた様にマクロもミクロも連立常微分方程式として連成される。空気流動のモデルについては、CFDはミクロで換気回路網はマクロモデルと考える。CFDは静圧と動圧を分けて扱うモデルであり、換気回路網は全圧を静圧として持つモデルと考えられる。そこで両者を全圧節点系として一体的な連立方程式モデルで扱える可能性がある<sup>[8]</sup>。全体のヤコビ逆行列計算まで行わずとも、サブデバインドしたマトリックスを緩く連成すれば、収束性と安定性は著しく改善されるだろう。熱回路網でも同様である。

#### 4.4 設備機器を含むシステムシミュレーション

今までNETSは建築系を中心にモデル化し、設備機器は、熱交換器や蓄熱槽等の受動的なものだけのモデル化

をしてきた。しかし最終的なエネルギー消費量を計算するためには熱源機器と搬送機器等も含めてシステムシミュレーションする必要がある。

こうした設備機器の計算理論は簡単なものから複雑なものまで様々存在しサブプログラムも作れる。こうしたサブプログラムをNETSの時間ループの中に追加し、自由な設備機器と建物とのつながりのモデル化を可能とする間接アドレッシング配列とアルゴリズムの方法については既に述べている<sup>[9]</sup>。ソルバプログラムの改良は容易であるが、むしろ開発の課題は直感的で分かり易く単体間をつないだりするモデル構築プログラムであろう。

### 5. 最後に

この熱回路網モデルは単に予測計算モデルとしてだけでなく、拡散系の一般モデルとしてシステム同定理論を考案し計算プログラムSPIDを開発して建物性能現場測定法にも展開している。これを可能にしたのは最小二乗法の新たな定式化法であった。さらに同じモデルに基づいて省エネ、省エクセルギーと熱的快適性の観点で最適化を実現する理論も考案し、計算プログラムSOCSも開発している。これはラグランジュ乗数法がヒントになったが、どちらも熱回路網モデルのシステム理論的な定式化法が基盤である<sup>[10]</sup>。シミュレーション計算だけを目的とするなら単なる数値解析モデルで間に合うかもしれないが、システム理論的な広い概念を持つ数学モデルで、システム同定、最適設計と制御まで包括的な理論体系を持つことも大切ではないだろうか。

#### 【参考文献】

- [1] ASHRAE Task Group on Energy Requirements for Heating and Cooling, Metin Lokmanhekim1971, (翻訳:木村建一), 電子計算機によるエネルギー計算のための暖冷房負荷算定法, '74年3月25日発行, (株)フジテクノシステム出版部編
- [2] 松尾陽, 横山浩一, 石野久弥, 川元昭吾, 共著, 空調設備の動的熱負荷計算入門, 発行: 日本建築設備士協会, '80年3月25日初版
- [3] 奥山博康, 野部達夫, 矢川明弘, 多井慶史, 登石久美子, 「昼光導入型ブラインドの省エネルギー性能に関する研究 (その4 窓の従来計算モデルの再検討と冷房負荷の測定値とNETSの比較)」, 建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2003年9月, pp243-244
- [4] 奥山博康, 倉渕 隆, 鳥海吉弘, 七岡 寛, 「全熱回収型集中換気装置の戸建住宅における省エネルギー効果研究 (その1 工学モデルの概要)」, 建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 2005年9月, pp1213-1214
- [5] 空気調和衛生工学会, 熱負荷算定小委員会, 宇田川光弘主査, 「熱負荷算定小委員会報告書・大空間の熱負荷計算法」, '93年3月
- [6] 大西由哲, 奥山博康, 永山啓樹, 大井元, 「車室内の上下温度分布の工学モデル」, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, E-8, 2007年9月, pp333-336
- [7] Hiroyasu Okuyama "State Space Approach to Building Environmental Analysis Using Thermal Network Concepts" Shimizu Tech. Res. Bull. No. 4. (Mar. 1985), pp45-51
- [8] 奥山博康, 「熱CADのための空間離散化モデル」, 建築学会環境工学委員会, 熱環境運営委員会第24回熱シンポジウム, 1994年10月, pp25-32
- [9] 奥山博康, 「空調システムシミュレーションの理論とアルゴリズム」, 空気調和衛生工学会学術論文集, 1982年10月, C-23, pp461-464
- [10] 奥山博康, 日本応用数理学会編集, 「応用数理」vol13, no.1, march 2003, 岩波書店, 「システム理論に基づく建築の伝熱・換気モデル」 pp61-71

以上[1][2][5]の他は [http://www.nets-club.com/article\\_list/list.html](http://www.nets-club.com/article_list/list.html) に在る。

【謝辞】 図の作成等で大西由哲氏の協力を得ました。