

熱CADのための空間離散化モデル

Spatial Discretization Models for Architectural Thermal Environment Computer Aided Design

奥山 博康

Hiroyasu OKUYAMA

Spatial discretization models suitable for building heat transfer and airflow calculation with architectural Computer Aided Design systems are discussed. The including and standardizing framework is required for the macroscopic engineering model and the microscopic computational fluid dynamic model, and also between any spatial discretization model such as the finite element, the finite difference and the control volume models. The unified and systematic approach is also necessary not only for realizing the design method but also for the measurement and optimum control method. For these purposes the framework of the Thermal and Airflow Network model and the State-Space method are introduced.

Keywords: Computer Aided Design, Thermal Network, Airflow Network, State-Space method, Spatial Discretization model, Standardization

コンピュータ支援設計, 熱回路網, 換気回路網, 状態空間法, 空間離散化モデル, 標準化

1 建築熱CADの定義

CAD (Computer Aided Design) はよく知られた言葉である。しかし建築熱CADという言葉は、建築温熱環境のコンピュータ支援設計という言葉の省略形であるとは思いますが、あまり一般的な言葉ではない。また設計という言葉も広い意味を持っているので、まず本論での熱CADとは何を意味するのかを述べておきたい。一口に設計と言っても抽象的な概念設計から具体的な実施設計まである。また単に製図だけでなく、計算による仕様や容量の決定など、数量的な図書の作成も含まれる。しかし現状のCADは単なる製図、作図あるいは描画の機能だけが強調して取り上げられ、設計という最適化の頭脳行為に予測評価と計算などで貢献する過程が不十分であると思われる。本論では、作図や描画などの視覚化によって、直接的に設計者に関連するユーザインターフェイスよりも、それ以前の伝熱、空気流動、冷暖房負荷や温熱・空気環境の予測計算を行う方法論に関して述べてみたい。すなわち建築CADシステムに適した計算モデルと解法の提案に重点を置くことにする。

2 建築熱CADに必要なこと

2.1 システムとしての計算モデル

我々は問題や課題に直面したときに、ともすればそれを構成要素に還元し、個々の要素を分析すれば必ずから問題全体が理解されると考えがちである。問題全体がこれらの要素の単なる加え合わせであればこれも正しいかもしれないが、実際には問題全体は個々の要素の相互影響によって連成しているものであり、システムとして考慮すべきことの方が多くであろう。建築伝熱計算に関して言えば、壁の一次元伝熱モデルという要素に還元し、これを精密に計算することに拘った歴史があるのは、こうした還元主義志向に関連があるであろう。

一方、数値流体解析をコンピュータグラフィックスと結び付け、室内気流と温度分布を表示すれば確かに説得力があり、まさに建築熱CADの最終成果のように思われるが、これを取り囲む周壁や隣室との出入口、換気口や隙間などにおける諸々の状態値すなわち境界条件と称するものが、本来は与えられるものではないので、関連する他の多層多数

室との相互影響を考慮して、未知数と考え同時に解かなければ実態に近い結果は得られない。さらに室の床、壁や地盤などの熱容量により、何日も前の影響を受けるので、正しい結果を得るためには長い非定常の伝熱計算を必要とするから、建築分野の熱CADモデルは、空間の領域的にも大きく、時間的にも長く現象を考慮することが要求される。すなわち総合的で動的なシステムで考慮する必要がある。

有限要素法では、計算の空間領域全体について、全体方程式と呼ばれるマトリックス方程式が記述されるが、陽解法的な差分法等では、ただ局所的なバランスを節点毎に算術的に計算していく、全体が見えにくい計算モデルである。ただ解いていく分にはよいが、数値的安定性などの明快な議論をするためには、システムとして把握できる現代制御理論での状態方程式のようなモデルで考察することが有利である。つまり通常は支配方程式としての偏微分方程式を最初に持ち出すが、むしろ重要なのは、これを離散化した後で得られる、空間領域全体での挙動を記述するベクトル・マトリックス形式の全体方程式であり、計算結果はこの数値的なシステムの状態の推移を表すものに過ぎないことを認識する必要がある。

2.2 標準化された計算モデル

モデル化のための空間離散化の手法としては空間差分法、有限要素法や検査体積法（有限体積法）などがある。各々の空間離散化には特長があるから、例えば室の空間は有限要素法で離散化し、壁は一次元の差分法で離散化し、隣室や建物の他の部分は大きめに検査体積法で離散化するというように、その部分々に適した離散化法でモデルを作成しながら、建物全体では連立した全体の常微分方程式が組上がるようにできれば便利である。このためにはこれらのモデルを包括する枠組み的な一般方程式と共通のパラメータ（係数）を定義しておく必要がある。

また伝熱モデルで、差分法などをミクロ的なモデルと呼ぶとすれば、これに対して検査体積法などはマクロ的なモデルと呼べるであろう。検査体積法は比較的に大きめに区切る場合にも適用されるからである。空気流動のモデルに関しては、数値流体解析モデルをミクロモデル、換気計算のモデルはマクロモデルと呼ぶことにする。こうしたミクロとマクロのモデルを方程式的にも一体的に扱う統一的な枠組みが必要である。

2.3 融通性と可変性を持つモデル

建築分野で考慮する伝熱や空気流動の現象は、様々な要因が複雑に関連し合っていることが多く、総合的に考慮しなければならない。従って計算モデルも融通性を持って対応できる必要がある。例えば熱流の多次元性という特徴が

ある。壁体について壁面の法線方向の一次元伝熱モデルでは不十分な場合として、壁体内の中空層を通気し、湿気や日射熱を排出するような場合が上げられる。設計者のこうした意図に融通性を持って計算モデルは対応できる必要がある。熱流の道筋について、計算モデルが固定的にできているのではなく、設計者が自由にモデル化できるようにすべきである。

また建築伝熱系では使用者や設備機器による計算モデルの構造的な変化が起こる。時間的な変化では事務所建築のスケジュール的な空調の発停があるし、住宅では夕方になれば戸戸を閉める場合もある。計算モデルのマクロな非線形性は、住宅では温度によって窓を開け閉めすることや、換気扇を発停することがそれに相当すると考えられる。さらに機械換気であっても、煙突効果や風圧などによって設計の送風量とかなり違ってくる可能性がある。計算モデルは以上のような融通性を持ち変化できるものが望まれる。

2.4 実用的精度を持つモデル

実現象を予測する以上は精度が重要なのは当然である。しかし必要なのは実現象に近いことであり、どれだけ方程式を細かく精密に解くかということではない。つまり数学的なモデルと解法の精度は必要ではあっても、これだけで十分ではない。例えば多層壁体一次元伝熱問題だけをいくら数学的に精度よく解いても、他の部分や空間との連成が精度のバランスがよくとれてモデル化されていなければ、結局は室温も壁の温度も実現象に合わないであろう。また室空間内での気流や温度の分布がいかに精密に計算できても、与条件とした境界条件が本来未知数で不確かであれば、総合的な観点から結果は信頼性に乏しいであろう。つまり、部分々のモデルはそれ程精密ではなくとも、全体的に精密さのバランスのとれている総合的なモデルは、ある部分だけ精密でありながら他の部分がおそろいなモデルよりも、実現象に近い良い結果を与えるであろう。全体にわたっての精密なモデル化が計算機的に無理がある限り、計算時間や計算機記憶容量なども考慮した実用的なモデルが必要である。

3 熱回路網モデル

伝熱計算モデルの図表示を電気回路の様に描いてみると、全て熱回路網と呼んで電気回路近似解法と混同視されるのが現状のようである。また数値計算機を用いる以上は数学モデルの内容が重要であるが、これが研究者によってまちまちである。著者の熱回路網 [1] は熱回路であって電気回路とは直接的な関連は無く、数学モデルや解法に特徴を持つが、その一つとしてCADに適した計算モデルであることが上げられる。

3.1 空間離散化モデルの共通の枠組み

著者の熱回路網は検査体積法あるいは有限差分法と呼ばれる空間離散化の方法から始まった。検査体積法とは、例えば室内空間の温度を一様としてモデル化する場合は室空間が熱流バランスの一つの検査体積となるが、このように工学的な判断により、熱流のバランスを成立させる比較的大きめの空間領域に分割する方法である。その他の空間離散化法としては有限差分法や有限要素法がある。これらの空間離散化法によるモデルと熱回路網の関係を示したのが図1である。

一般に拡散現象であれば、熱の移動だけでなく、建物内でのガスの移動なども含めて、空間的な離散化モデルで計算するのが最も実用的である。そしてこの熱回路網は、これらの空間離散化法のモデルに共通の枠組みを与えることができる。共通の枠組みとは、異なった空間離散化のモデルを自由に接続して、全体で一体的な方程式モデルを組めることなどを意味する。そしてこの方程式が現代制御理論やシステム理論でのマトリックス形式の状態方程式と呼ばれるものである。

これを可能にするのが、完全連結システム記述と呼ぶ節点方程式と一般化熱コンダクタンスや熱容量と呼ぶシステムパラメータの定義である。ここに完全連結システムとは全ての節点は各々他の全ての節点と結び付いているという意味である。ただし、ある二つの節点間に非0の一般化熱コンダクタンスのデータを与えたところだけ実際に結び付くことになり、データを与えなければ実際には結び付かないことになる。従って状態方程式を構成するコンピュータプログラムは同じでありながら、データの一般化熱コンダクタンスの与え方で、どの様な形状であっても、どの様な空間次元の対象物であってもモデル化できるわけである。

また伝導、対流(移流)、放射や伝達等どの様な伝熱形態であっても、一般化熱コンダクタンス $c_{i,j}$ という一種のパラメータで表現することによって、単純で簡単な数式モデルと計算プログラムにすることができる。つまり他によく見られるような、沢山の記号を用いて場合分けをした、複雑でありながら一般性のない熱流バランスの式や計算プログラムの欠点を克服することができる。

さらに有限要素法において要素毎の小さなサブマトリックスを重ね合わせていって組上がる全体のマトリックスについては、普通有限要素法によって定式化されている熱コンダクタンスマトリックス C と熱容量マトリックス M の他に、境界条件の定式化に工夫すれば規定入力に対する駆動マトリックス C_0 と呼ぶものと自由入力に対する駆動マトリックス R と呼ぶものも構成 [1] できる。まず $[C, C_0]$ の i 行 j 列の要素を一般化熱コンダクタンス $c_{i,j}$ と見なし、 M の i 行 j 列要素を一般化熱容量 $m_{i,j}$ 、 R の i 行 j 列要素を自由入力係数 $r_{i,j}$ と見なせば、これらのパラメータと完全連結システムの節点方程式においては、他の検査体積法の様な空間離散化モデルと共通であり、互換性を持つこと

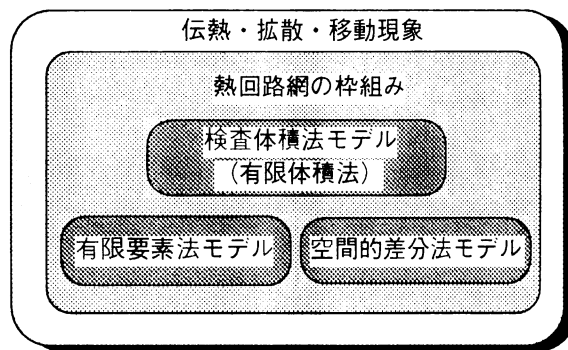


図1 空間離散化モデルの標準化

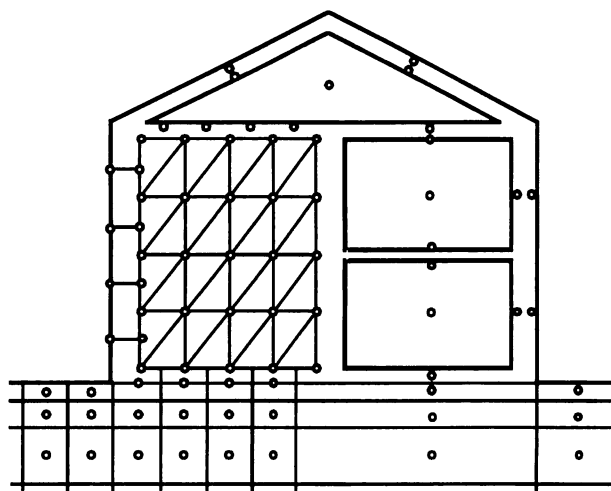


図2 異種離散化モデルの一体化

ができる。空間差分法は熱移動の偏微分方程式を空間座標に従って差分化したものと定義されるが、まさに差分化した時にこれらのパラメータが得られる。しかし差分法自体は有限要素法と違って全体方程式を構成する方法論ではない。これは差分法の場合、解法の多くは節点毎の陽的な計算であり、空間領域全体的な連立方程式を陰的に解くことが少ないからでもある。従って差分法では、 x 、 y と z の座標軸に沿って、節点を特定するために、 i 、 j と k の複数の添え字番号の組合せを用いることが多く、全部の節点の中で1から総節点数までの節点番号を順次割り付ける必要もないが、もし全体方程式を組み上げようとするならば、こうした節点番号の振付けが必要になってくる。

図2は地盤伝熱を含む建築伝熱系であるが、ある室空間を比較的に詳しく計算する必要があるとすれば、その空間領域には有限要素法などが離散化に適しているであろう。この空間に接している壁、床や天井などの熱伝導のモデル化には差分法が適しているかもしれない。しかしさらに遠い室空間や壁体伝熱は検査体積法で十分であろう。例え最も重要な室空間だけ予測計算できればよいとしても、これに接する空間領域と間接的に関与してくるさらに遠い空間領域は、その室空間への適切な境界条件を与えるために同

時に連成して計算されるべきである。こうして各々の空間領域に適した離散化法を適用しても、本論での考え方により各々から共通のシステムパラメータ $c_{i,j}$, $m_{i,j}$ や $r_{i,j}$ が出力され、完全連結システムの節点方程式による全体系の状態方程式がやはり一般的に成立する。

この場合、全体の節点数が多すぎて連立常微分方程式を一体で解くのが困難であれば、全体のコンダクタンスマトリックスの細分割を行って、推移行列を近似的に得ること [2] もできるし、後述するようなシステムの濃縮や、サブシステムの連成法等も使える。なおモデルのシステムパラメータについて、建物全体を壁体のような固体部分と、室空気等のような流体部分に区別する必要はないことや、室空間を取り囲む壁体の内表面間の輻射伝熱も特別扱いする必要はないこと等に留意されたい。全ては一般化熱コンダクタンス $c_{i,j}$ の一種類の係数で表現され、完全連結システム節点方程式で一般的に記述されている。

3.2 状態方程式の濃縮

座標系に則った建築CADのデータから、伝熱モデルを発生するためには有限要素法や差分法が適しているが、粗い離散化で十分な領域であれば、この濃縮法 [1] によって実質的に節点数を減らせる。適切な例ではないが、有限要素法によって壁体を法線方向だけでなく面方向にも分割してしまったとしても、面方向は温度が一様であるという線形関係を与えれば、実質的な節点は法線方向のわずかな節点だけに減らすこともできる。このための濃縮法とは、まず全状態変数を主変数と従属変数に分け、定常状態の主従の関係から、全状態変数を主変数だけで表す線形関係をつくる。この関係式をもとの状態方程式に代入し、さらに左から転置したこの関係式を乗じて二次形式とし、時間領域で積分した式を書けば、これを明らかに恒等的に0にする式が得られる。これが濃縮された状態方程式である。

3.3 サブシステムの連成理論

熱回路網のモデル化を容易にするために、部品のライブラリと、このライブラリからの組上げという手順を導入することができる。この場合に部品とは、壁体や暖房機器など寸法や容量などが違っていても、伝熱構造的に類型的なものとして予めモデルのデータを用意しておくことができるものを言う。時間積分を行う方法に関しては、全体で一つの状態方程式を構成して行う方法と、部品としてのサブシステム各々での状態方程式を連成する方法 [1] の二通りが考えられる。

何れにせよ節点番号に関して、部品のライブラリの段階では局所番号を、全体モデル構成の段階では全体番号が定義される。ライブラリの部品の具体的な内容はシステムパラメータであるが、これらの添え字番号は局所番号によって定義されている。しかし全体モデルをユーザが部品

を用いて組み上げていった場合に必然的に全体節点数が決定され、同時にモデル全体での節点番号と局所番号の対応が自動的に決っていく。従ってこの時システムパラメータの添え字番号も全体のものに改番されるので、モデル全体に関する完全連結システム節点方程式により全体の状態方程式も組上がったことになる。ここに何等の複雑なアルゴリズムもデータ構造も必要はない。

もう一つの部品の連成の方法 [1] は、全体で一つの状態方程式にせず、部品毎の状態方程式を出力(媒介)方程式と呼ぶものでつないで時間積分を行うものである。部品としてのサブシステム間をつなぐ媒介変数の全体系でのベクトルについて、時間的な漸化式を構成することができる。一方個々のサブシステムでは媒介変数と気象条件などが決められれば時間積分を行える漸化式が記述できる。従って計算機に負担のかかる逆行列の計算をする最大のマトリックスのサイズは、最大の部品の節点数か、あるいは総媒介変数の個数のサイズですむことが、この連成法の一つの利点である。またこうした連成のアルゴリズムは、部品によらず一般化しておくことができるから、CADのデータに適したシステムティックなモデル化と時間積分が可能となる。

4 換気回路網モデル

数値流体解析で建物全体を解くのは無理があるので、最小計算単位を室あるいはゾーンとし、これらの間での空気流動を計算する換気回路網と呼ぶ工学的なモデルも必要になってくる。換気回路網の基本式は、流路に関する差圧と風量の関係式と、各室での連続式あるいは質量保存式の二種類である。差圧と風量の関係式における係数には圧力損失係数と指数などがあるが、これらは実験的な係数であり、多種多様な条件に完備するのが困難で、流量そのものによっても本来は変化するという難点がある。しかし必要精度で実用的に解くという工学的な要求を満たせば良いであろう。逆に、細かく厳密に考えれば条件の変化に従って多少変化するとしても、いかに実用的な係数とするかということが工学の一つの役目ではないだろうか。

4.1 モデルの構造と解法

現状では熱回路網と同様に、換気回路網といっても内容が研究者によってまちまちである。著者の換気回路網 [1] の基本的な構成要素はゾーンと流路の二つだけである。ここでの流路は、開口だけではなく隙間やダクトなどあらゆるものを、同じ差圧と風量の関係式で扱う。例えば建築換気系だけでなく機械換気を伴うダクト系を含んでいても、ダクトの分岐点に十分な容積のゾーンを想定することにより、このゾーンでは動圧が全て静圧に変換されると見なされるから、換気系の全部の節点は全圧を静圧として持つ節点系と考えることができる。

構成する方程式モデルは解法に依存する。差圧と風量の関係式が非線形であるから、繰り返し収束計算は避けられない。そして著者の方法は圧力仮定法である。従って全体方程式は、全部の節点の仮定圧力ベクトルに修正圧力ベクトルを加える計算過程であり、熱回路網のように一度に解を表示する方程式は記述できない。この解への接近法は修正ニュートンラプソン法である。従ってどれだけ単純で一般的なデータ構造とアルゴリズムで、そのヤコビアンマトリックスを構成するかが問題となる。このために仮定圧力による各ゾーンでの風量収支計算を基本的ルーチンとして必要とするが、ここで著者は圧力節点番号に対する間接アドレッシングと呼ぶ方法 [3] を用いて単純にしている。さらに圧力に関する非線形の方程式の持つ特徴により、普通のニュートンラプソン法では振動を起こしやすいことが示され、著者は普通のニュートンラプソン法で得られた修正量に 0.5 を乗じている。圧力損失指数が必ずしも 2 ではないことから 0.5 が最適ではない場合もあるが、最適値を求める計算 [4] などを行っているより、実質的求解の計算を進めて行った方が有利であろう。

4.2 ミクロとマクロの統合

換気回路網のマクロモデルは、節点の圧力に関する連立非線形方程式系と見なされる。一方数値流体解析のミクロモデルは、同様に節点の圧力に関する連立非線形方程式系、あるいは連立線形方程式系と見なされる。従って、図3のように換気回路網のモデルと解法は数値流体解析のモデルと解法を包含できると考えられる。このことは両方のモデルにわたって、同一のデータ構造とソルバーが包括的に適用できることを意味する。

換気回路網のヤコビアンマトリックスは完全に逆行列の計算を行っている。しかし数値流体解析モデルまで含めて全体モデルの逆行列計算を行うのは、多くの場合にその膨大な節点数のために困難であろう。おそらくヤコビアンマトリックスの非0要素の分布によって近似的にサブマトリックスに分割し、それらのサブマトリックスについては厳密な逆行列を求めても、サブマトリックスの間は緩やかに連成する何等かのレンマ [5] かスキームを適用できると思われる。

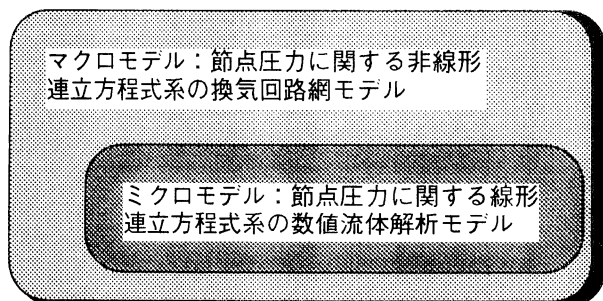


図3 包括的な空気流動モデル

5 伝熱と空気流動の連成

例えば煙突効果によって換気の風量は影響を受ける。逆に冷えた外気が沢山入ってくれば室温は下がるであろう。こうした様子は計算モデル上で表現すれば、室温に対応する空気密度は換気モデルの駆動力として換気風量に影響を与え、換気風量は対流(移流)としての一般化熱コンダクタンスを形作り伝熱モデルを構成すると言える。この両者のモデルの相互影響を考慮することを連成させると呼ぶことにする。ここでは連成させるための方法 [1] を述べる。空気流動系において運動量や流量収支のバランスをみる一つの検査体積内の圧力の節点と、これに空間領域で一致する熱流の検査体積の温度の節点は一対一に対応させることができる。つまり熱回路網で得られた節点温度に従って空気密度が計算され、対応する換気回路網の圧力節点の属する検査体積が持つ空気密度として使うことができる。逆に二つの圧力節点間の風量が換気回路網によって求めれば、この二つの圧力節点に対応する熱回路網の二つの節点間の一般化熱コンダクタンスが決まる。一方、壁や地盤などの固体においては空気流動を考慮しないから、固体中の熱流の検査体積の節点に対応する空気流動の圧力節点は存在しない。従って熱回路網の節点系は換気回路網の節点系を包含すると考えることができるが、とにかく両系の節点番号の対応をとれば、こうした連成のデータ構造とアルゴリズムは単純で一般的なものとできる。

6 説明的具体例

図4は機械換気装置、熱回収装置と床暖房装置を持つ建物の断面図を示す。この中の吹抜け空間を詳しく計算するものとし、この空間はミクロに空間差分法で離散化し、他の空間は比較的粗いマクロな検査体積法で離散化する。空気流動系のモデルは換気回路網として図5で表される。圧力節点はミクロもマクロも区別せずに通して番号が付けられる。ミクロな領域内は見やすくするために、丸で囲んだ節点番号と両方矢印の流路表示は適宜省略している。送風機はウロコ印で示すが全圧と風量の特長曲線を持ち、煙突効果などでの風量変化を考慮する。また伝熱系は熱回路網として図6で表される。節点は空気の節点だけでなく、壁などの固体部分も存在する。節点間のダイオード記号は対流(移流)による一般化熱コンダクタンスを表し、これらの値は空気流動系の計算結果により決定される。従って流れの向きによっては実際には0のものもある。壁表面の対流伝達や壁内部の伝導は対称性を持つ一般化熱コンダクタンスであり抵抗の記号で表す。また室内表面間の長波長熱放射伝達も存在し、やはり一般化熱コンダクタンスで表されるが、図では見やすくするために省略している。日射のような短波長放射は外壁表面、ガラス面や床面に吸収され、結局は節点での発熱として扱われる。

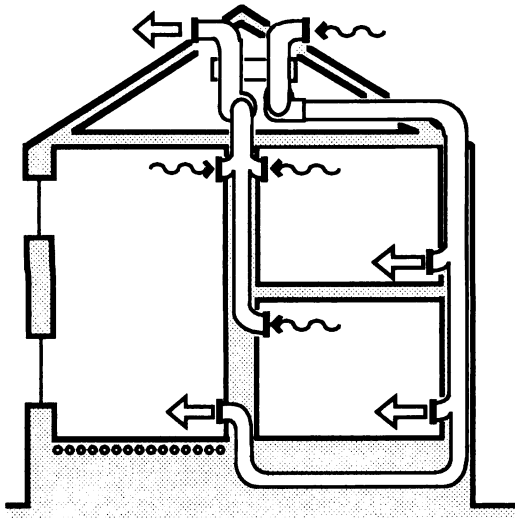


図4 建築断面図

さらに比較的に大きな空間での温度成層を工学的にモデル化する可能性を示したのが図7と図8である。これは吹抜け空間の上下をいくつかのゾーンに分割し、全てマクロな換気回路網のモデル化と解法で扱おうとする案である。ただし、ここに熱プルーム流路と呼ぶものが、床面に熱的に接する発熱ゾーンと呼ぶものから、直接的に天井近くのゾーンまで達しているモデルの構造になっていることに注意されたい。床面が床暖房や窓の透過日射によって暖められ、さらに発熱ゾーンの空気を暖め、熱プルーム流路を通して上昇する。この場合の熱プルーム流路の諸係数を定めるためには、土木の分野か、換気分野での既往の研究成果[6]が活用できるのではないかと推測される。既に著者は定性的にはこのモデルが可能性を持つことを確かめた。これ

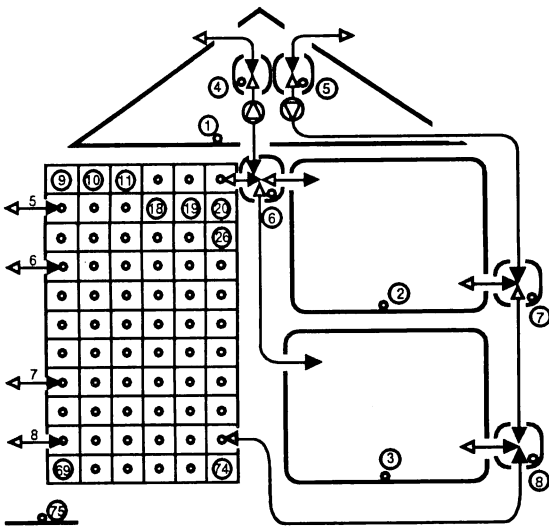


図5 数値流体解析モデルを含んだ換気回路網

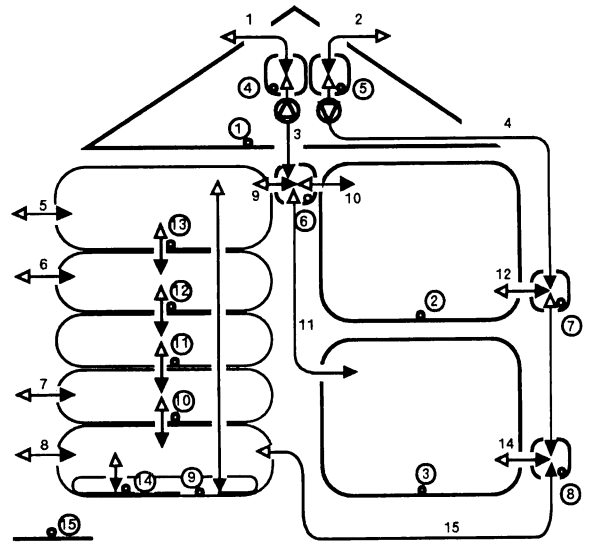


図7 熱プルーム流路を持つ換気回路網

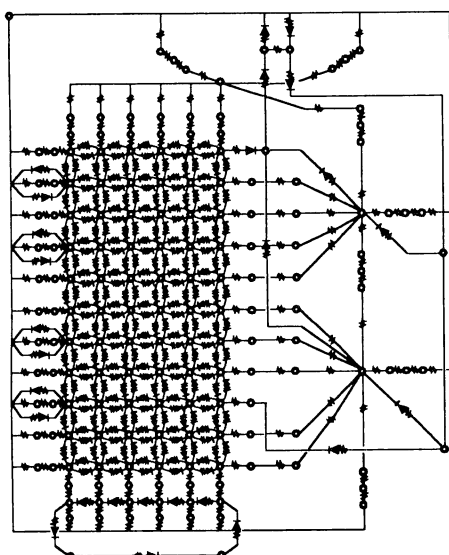


図6 数値流体解析モデルを含んだ熱回路網

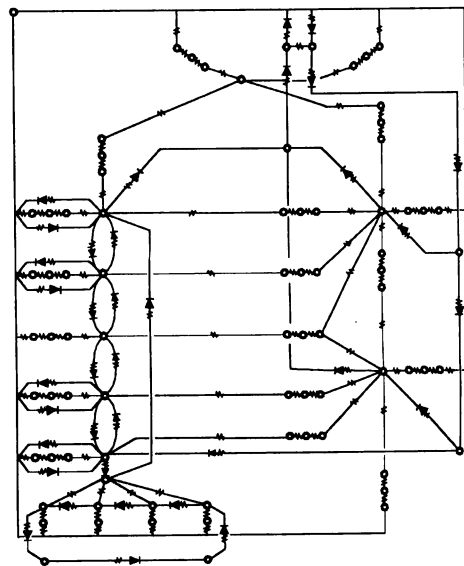


図8 熱プルーム流路を持つ熱回路網

らのモデル図はCADデータとユーザ入力により自動作成できるが、もし必要な場合に計算モデルの構造を把握するために非常に重要である。

7 プリプロセッサ NETSGEN

熱・換気回路網モデルをパソコンで作成していくプリプロセッサ NETSGEN を開発している。しかしこれはまだCADデータからモデルデータを作成するようにはなっていない。まず熱回路網のモデル作成の手順は、大別して部品作成とこれらの組立の過程からなっている。部品作成は、図9の壁体伝熱などの1次元伝熱部品、2次元や3次元の伝熱部品、さらに複雑な熱流の暖房器などを工学的な判断で作成する自由次元部品作成などから選べる。座標系に乗せられる比較的単純な部品は有限要素法の離散化も選択できる。モデル全体作成のための組立過程においては、既に作成した部品をライブラリから参照し、壁体等であれば壁面積などの物件毎に変わりうる仕様を与えながら、図10や図11のように全体モデルを構成していく。この全体組立の過程でライブラリの部品の持つ局所節点番号から全体節点番号に自動的に改番されていき、システムパラメータの添え字番号も全体のものになる。

図12の様な換気回路網のモデル作成手順も熱回路網と同様に、部品作成と全体の組み上げの過程からなっている。換気回路網の基本構成要素はゾーンと流路だけであるが、例えば流路に関して、隙間、換気ガラリ、窓、換気モータやダクトなど様々なものをライブラリとして作っておくことができる。また送風機についても方式や容量などについてライブラリを作っておくことができる。さらに高層の事務所建築等のモデル化のために、基準階の換気モデルを部品として作っておき、これを上下方向に積み上げ繋ぎ合わせていくことにより、全体モデルを作成しやすくなることもできる。

全く自動的に建築CADデータから計算モデルを作成するかどうかは、モデル作成の自由度を重視するか、制限の多い既製の伝熱構造のモデルだけで満足してしまうかに関わっている問題である。この問題に関する一つの実際的な妥協案は、建築CADの平面図や断面図を画面に表しながら、この図に重ねるような形で熱・換気回路網のモデル図をユーザにマウスで描かせることである。例えば熱回路網の壁の部品の箱をCADの図の壁の位置に重ねて、これらに対応させる指示を行えば、CADデータから自動的に壁の熱回路網部品モデルが作成できよう。同様に建築の断面図の上で、その室空間の図に対応させて換気回路網のゾーンを描けば、CADデータからゾーンの床面の高さや容積のモデルデータが作成されるであろう。マクロモデルの部品となるであろうマイクロモデルに関しては、そもそも座標系に則ったモデルなので、CADデータからこれを発生させるのは比較的容易である。

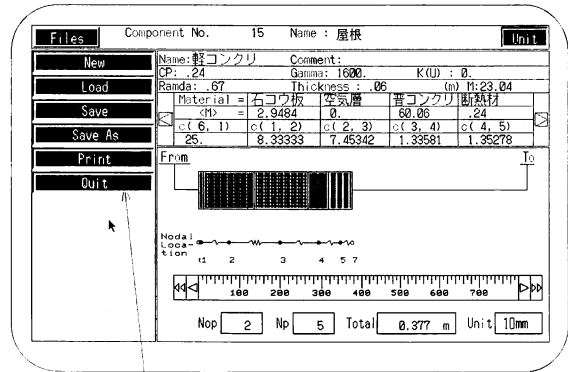


図9 壁体一次元伝熱部品作成

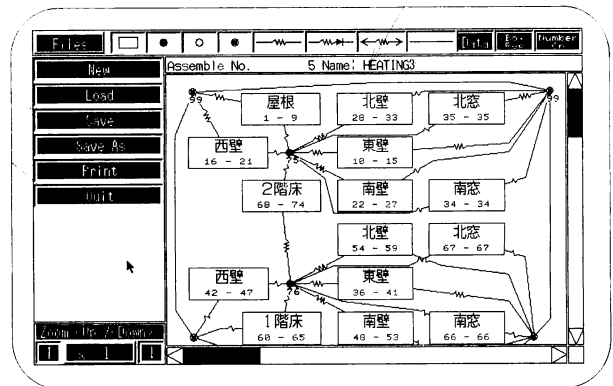


図10 熱回路網全体モデル作成

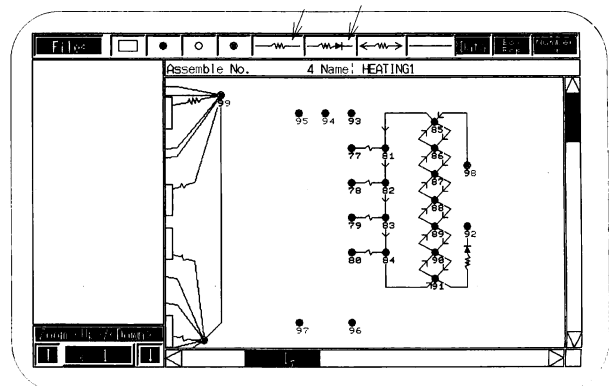


図11 成層型蓄熱槽の全体への追加

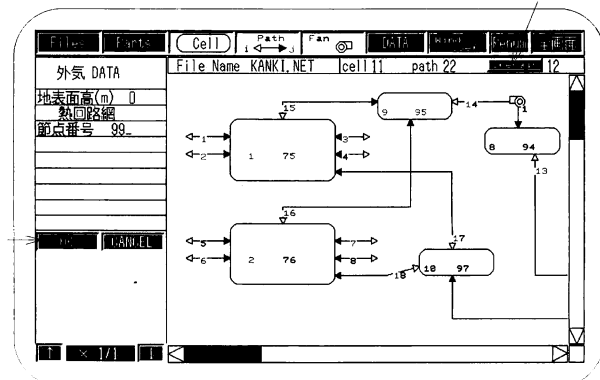


図12 換気回路網の全体モデル作成

8 モデルの構造的な変化

建築伝熱計算の分野で特徴的なことは、与える境界条件が変化しない一定ではなく気象条件のように変動することであり、熱容量の影響を考慮するなら計算する期間も数日や何ヶ月にもわたることであり、さらに最も重要なことは伝熱系の構造が時間あるいは状態そのものによって変化することである。この最後の問題のためにモード変化 [1] という概念を用いる。

あるモデルの構造に対して1対1に対応するモード番号というものを定義する。初期の頃はモデル全体に対してモード番号を定義していた。しかし例えば n_r 室の多数室系で各室において独立に n_m 通りのモデルの構造を持ち得るとすれば、全体モデルで起こり得るモデル構造は $n_m^{n_r}$ 通りとなり、容易に膨大な数になる。そこで部分番号というものを導入した。ここで部分とは空間的な領域等についてであり、今の例では各室が部分となる。従って全体モデルの構造は、部分の番号とそのモード番号の二つの番号を用いることにより表現できることになり、モード変化のシステムパラメータを格納すべきデータセット個数は $n_r \times n_m$ ですむ。

モード変化を行うことは、部分毎のモード番号を決定していくことであり、スケジュールと状態フィードバックの二通りが実行できる。スケジュールは明らかであるが、状態フィードバックとは、温度、ガス濃度と圧力の状態ベクトルから、一般的なマトリックス演算式と判別によってモード番号を逐一決定していくことである。

9 体系的なアプローチ

熱CADの計算というのは予測計算だけに限らないであろう。設計を最適化の行為と考えるならば、経済性などの評価関数に関して諸々の拘束条件のもとで、最適化の計算を行うことも将来は必要になってくる。設計において最適化するのはモデルの構造やパラメータなどである。数値計算を前提にした数学的な最適化理論は制御工学や情報工学などでかなり研究されているが、対象とする計算モデルはマトリックスを使った方程式で表されることが多くなった。特に現代制御理論で用いるマトリックス形式の状態方程式は、様々な現象や系であっても形式上は同一の連立常微分方程式で表している。熱CADの計算モデルもこの様な統一的な方程式モデルとしておくことによって最適化理論などの数学的成果が応用しやすくなる。また予測計算や最適設計だけでなく、建物の実態的な伝熱・換気などの性能の測定法を状態方程式モデルのシステム同定理論 [7][8] によって作ることができ、さらに冷暖房換気等の最適制御には現代制御理論の成果も応用 [9] し易くなる。従って計算モデルが状態空間法という統一的形式に則っていることにより、我々の分野の問題に対して統一的でシステムマティックなアプローチを行うことが可能となる。

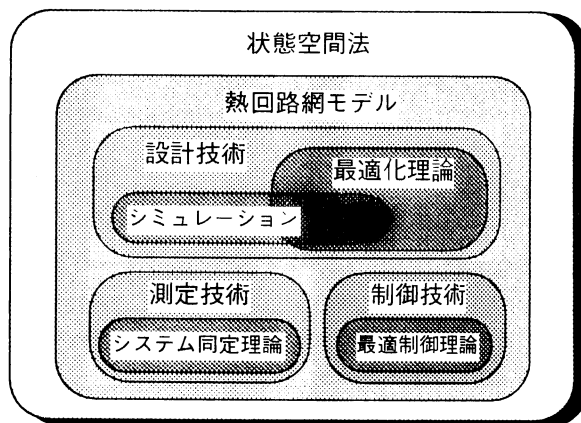


図13 状態空間法による体系的アプローチ

10 最後に

各種の空間離散化モデルの間だけでなく、従来の熱負荷計算のようなマクロモデルと、数値流体解析のようなマイクロモデルの間を包括する枠組みが必要である。また単なる予測計算だけでなく、最適化理論による設計法、あるいは測定法や最適制御法までの統一的で体系的なアプローチが必要である。つまりモデルと方法論での標準化が必要である。この要請に応えるものとして、熱・換気回路網モデルの枠組みと、状態空間法が持つ可能性を述べた。

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", 早稲田大学 建築環境工学 学位論文, 1987年12月 (清水建設研究報告別冊第26号 '89年6月)
- [2] 奥山博康, 益子智久: "回路網モデルによる建築環境シミュレーションプログラムの開発 (その5: 大規模節点数モデル対応法とPID制御の計算事例)", 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1989年, p.737
- [3] 木村建一編: "建築環境学1", 丸善株式会社, 1992年4月発行
- [4] Magnus K. Herrlin: "Air-Flow Studies in Multizone Buildings, Models and Applications", Department of Building Services Engineering, Royal Institute of Technology, S-10044 Stockholm, Sweden, (1992) ISSN 0284-141X.
- [5] Gerald J. Bierman: "Factorization Method for Discrete Sequential Estimation", Mathematics in Science and Engineering Volume 128, (1977), Academic Press, INC. ISBN0-12-097350-2.
- [6] Yonghui Jin: "Particle Transport in Turbulent Buoyant Plumes Rising in a Stably Stratified Environment", Ventilation Division, National Institute of Occupational Health Solna, Sweden, (1993), ISBN91-7045-228-8/ISSN0346-7821, quoting Morton BR, Taylor GI, Turner JS.: "Turbulent Gravitational Convection from Maintained and Instantaneous Sources. Proc. Royal Soc. London Ser. A234(1956)1-23.
- [7] Hiroyasu Okuyama: "System Identification Theory of the Thermal Network Model and an Application for a Multi-Chamber Airflow Measurement", Building and Environment, Vol.25, No.4, (1990) p.349, Pergamon Press.
- [8] Hiroyasu Okuyama: "Recent Progress on the Multi-Chamber Airflow Measurement System", Proceedings of IS-RACVE (in Tokyo) by ASHRAE (1992) p.351.
- [9] 奥山博康: "熱・湿気回路網モデルを用いた状態とエネルギー供給の最適化理論と数値実験", 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1994年, p.137.