

1. はじめに

筆者は十数年にわたり表題に関する研究を行ってきた。初期に直感的に信じた可能性がようやく具体的で全体的な姿を表すようになってきたように思う。これまでの一連の研究は、一見様々な現象の背景に存在する普遍性を見通すことにより、すなわち一般モデルにより可能となった気がする。そこで浅学で僭越ながら、既往の研究の概観と今後の研究課題の展望を、こうした観点から少しばかり述べさせて頂き、これがもし読者に別の異なった視点を提供することになれば幸いである。

2. 工学とは

少し大きな観点から見れば、工学とは理学的発見や成果あるいは技術の“利用性の向上を図るもの”と捉えられないだろうか。例えば新しい物理・化学的現象の発見は、これを利用するための新しい工学的技術の発生の種となるし、コンピュータの存在はこれを利用するためのソフト的な工学技術の発達を促す。コンピュータと基礎数学を、当分野で利用する種とした場合、解法の基礎は殆ど既に数学で示されているから、何が研究し工夫すべき最も重要な問題かと考えれば、そうした解法とコンピュータ数値計算の特徴を最大限に活かす数学モデルとなるのではないだろうか。

3. 建築分野の特徴

近年、自然空調や環境共生建築が関心を持たれるようになってきた。我々はともすれば機械設備と化石エネルギーに安易に頼りがちであるから、原点に帰り建築的手法の適用を図ることは、地球環境の観点からも重要である。これを旨とした建築と設備のシステムで

は、不規則な変動をし安定的な供給源ではない自然エネルギーを最大限に利用しようとする。従って力任せ化石エネルギー任せに一定の環境をつくるシステムを設計・制御するよりも難しい。なぜならば設計し制御するためのシステムのモデルが“時変性や非線形性”など伝熱系の構造的変化を考慮したものでなければならぬからである。単純な例を上げれば、事務所建築ではあまり行われぬが、住宅建築では通風や自然対流あるいは雨戸の開け閉めなどが利用される。またこうした建築の数学モデルは、建物全体的な連成と、偏りなく諸要因を考慮すると言う意味で“総合性”が必要である。我々は多くの場合に問題へのアプローチ法が還元主義的で分析的なものに傾きがちであるのに対して、建築では要素の分析ではなく、むしろ“合成の過程”を評価し最適化すること、すなわちシステムが研究課題となるのが特徴であろう。

4. 発展の経過

現在でさえ建築伝熱解析と言えはなぜか壁面一次元伝熱を最重要視する風潮があるように見えるのは前述の還元主義とは無縁ではないだろう。また励振と応答のモデルである時系列応答係数法を斯界の熱負荷計算の標準として提案し採用したのは、古典的制御理論の伝達関数法の思想に支配されていたからかもしれない。しかしこのモデルは伝熱系の非線形性と時不変性に対応が困難な短所がある。その当初に状態空間法の思想に沿った方法論が提案されなかったのは残念である。一方、空間的な温度分布に関する熱平衡式を立てて非定常伝熱をモデル化する方法[1],[2]もあ

るが、汎用性を実現するための一般式の工夫等に改良の余地があるのではないだろうか。

筆者は学生時代にウィスコンシン大学太陽エネルギー研究所が出した研究報告書の付録[3]に太陽熱集熱器のモデル化の方法をみて本熱回路網モデルを着想した。その文献の数式モデルには少し間違いがあり、全体方程式もなく、実際の計算結果も示されてはいなかったが、汎用的な伝熱計算プログラム[4],[5]をつくるためのヒントとしては十分であった。

しかしこの時はまだシステム理論というさらに上位の概念との関連など思い及ばなかった。筆者が会社に入り、席をおいた近くでは、建築設備のコンピュータコントロールの研究をしており、現代制御理論の本[6]を見る機会があった。そして当時の筆者の熱回路網が、その本の中で示される状態空間法の状態方程式を構成するための方法になることに気づくのは容易であった。この時に初めて、現代数学の成果が、このモデルを通して応用できる見通しが立った。しかし最初はシミュレーションのための解析的時間積分法[7]を思い付いた程度で、最適制御理論の一つを実際に数値実験[8]できるようになったのは、後になって離散時間系で解説した教科書[9]に出会ってからであった。一方筆者の熱回路網は、空間離散化された一般的拡散系のモデルを包括する枠組みをもつことも初期から直感したが、厳密に数式的に関連付けるには数年かかった[10]。

換気の計算プログラムをつくり始めたのは、会社に入ってから現場から依頼された問題に対応するためであった。計算で用いる物理法則は当たり前であるが、コンピュータ利用にふさわしい単純で一般的なモデル化の方法、圧力に関する非線形連立方程式の確実な解法などは問題の存在さえ認識されていなかった。筆者は解法上の試行錯誤も繰り返し[11][12]現在に至った。

熱回路網のシステム同定理論[13]を考えるきっかけになったのも太陽エネルギーの論文

誌[14]であったのは偶然であろうか。とにかくこれを動機として最小二乗法の本質を考察し、よくある重回帰分析の教科書の定式化法も、より合理的な形に改められると考えるまでになった。しかしこの理論の最初の適用は、伝熱系ではなく、トレーサガスの拡散系に行い、第一世代の多数室換気測定システム[15][16]を試作した。また研究の背景には原子力発電所事故時の放射性ガスの付近民家への影響評価があったのは皮肉である。

筆者の学位論文[17]は、熱回路網モデルを利用するほんの一部をまとめたものである。当分野でのソフト上の研究課題は、設計法、測定法と制御法に大別できるのではないかと思われるが、残された主要な課題に共通しているのは最適化問題と考えられる。また研究成果にもとづく開発も、非常に多くのことを残しているが、数学的処理プロセスとユーザの間のインターフェイス開発も劣らず重要なことと認識している。

5. 熱回路網モデル

現状では、モデル図表示を電気回路のように画けば、数学モデルの内容が人によって違っているにもかかわらず、全て漠然と熱回路網と呼んでいる。一般に工学上の手法で同じ名前でありながら中身が違うのは好ましくないであろう。こうした混乱が起きているのは数値計算機がなかった頃に種々の物理現象を、相似する等価電気回路を組んで模擬実験していたことと混同しているためと思われる。筆者の熱回路網は、電気回路とは直接的関連はなく、強いて関連があるとすればモデルの図表示がそのような様相を呈していることだけであり、これとて熱的つながりを表現できさえすれば何も電気分野の記号を用いる必要はない。熱回路網は熱であって電気ではないのである。筆者の熱回路網の数学モデルは、必要十分な簡潔さがありながら完全な一般性を持つ節点方程式によって状態方程式が構成されている。この全体方程式扱いによって計算

モデルをシステムとして把握でき、固有値や時間積分の安定性などのシステム内部構造の議論が明解になるだけでなく、解析的な厳密解を示すこともできた。さらに方程式のパラメータの合理的な定義により、各種の伝熱形態や拡散形態が混在していても一般的モデルで表示でき、また有限要素法、空間差分法や検査体積法などの空間的離散化モデルを広く包括してモデルの合成や互換も可能とした。さらに現代制御理論や最適化理論の、各種工学分野に共通して利用できる数学的成果を直接的に適用できる数学モデルの形になっている。近い将来、“伝熱モデルの標準化”の必要性が認識されるようになれば、筆者の熱回路網が大きな可能性を提供できるだろう。

6. 換気回路網モデル

建築分野では、同じ空気流れの問題でも多層多数室で扱うことが多く、前述したように“建物全体的な連成”を考慮する必要がある。それ故にミクロ的な数値流体解析だけではなく、マクロ的な換気計算モデルが重要である。このためのモデルとして様々な換気回路網モデルが多くの人によって提案されている。従って自ずとこれらには優劣があるわけであるが、“モデルの簡潔性と一般性”、“圧力に関する非線形連立方程式の安定的な解法”や“モデルのパラメータの完備性”などで評価できるのではないだろうか。一つ目の項目は標準化のためと他の流れモデルとの合成を図る場合に重要になってくる。二つ目の項目に関しては、今なお流量仮定法との優劣を論じなければならないのであろうか。三つ目の項目は、数値流体解析では空気粘性など基本的かつ普遍的な物理特性を系のパラメータとするのに対して、換気計算では多分に実験的なパラメータを必要とすることからの宿命的研究課題でもある。また有効質量など不確定的パラメータの問題があるが、換気計算モデルを定常から非定常に拡張することも今後の課題であろう。

7. ミクロとマクロの統合化

空気流動のモデルについて本節題の問題が研究[18]されている。ミクロは数値流体解析モデルであり、マクロは換気計算モデルである。前者は微分型で後者は積分型で一見全く異質なモデルに思われるが、後者の圧力に関する非線形連立方程式系で前者を包括的に統一できると思われる。むしろ問題なのはマクロモデルのパラメータをなるべく演繹的なモデルから決める方法であろう。また伝熱と流れが連成するのが本来の現象であるが、伝熱に関して固体領域と流体領域を分けて扱うような不統一性による不利益は筆者の熱回路網モデルにより避けることができる。また将来CAD的にモデルを作るようになるとすれば筆者の主張する標準性やこうした統合性が問題になるであろう。

8. システム同定

例えば寸法を測ることは物差しをモデルとした同定と見なせるように、筆者の空間離散化した拡散系の一般モデルを物差しとしたシステム同定によって色々な測定を行うことができる。例えば筆者の多数室換気測定システムはトレーサガス拡散系の同定であり、理論自体は伝熱系にも応用している。システム同定はシミュレーションとは逆の問題であり、車の両輪のごとく完結した理論体系をつくるため重要である。しかしさらに同定するための励振の最適周波数に関する理論的追補と、測定装置自体の分散化・小型化により精度と使いやすさを向上する開発が必要である。なおシステム同定理論に関連して、伝熱系を必要最小限の次元の状態方程式で表現するための研究も必要であろう。

9. 最適制御

建築伝熱系の理論的最適制御にも制御モデルとして筆者の熱回路網と同定理論が利用できる。既に筆者は、二次形式の評価関数と離散時間システムを用い、最小二乗法で最適レギュレータ制御則が解けることを示した[8]。

しかし冷暖房分野の場合、最適レギュレータ制御の問題よりも、熱負荷予測による最適蓄熱運転のような問題を扱った方が実利効果が大きいかもしれない。その場合に、演繹的に制御モデルをつくるのでなければ、システムの同定を行う必要がある。実際の経験から、半分は演繹的なグレイボックスモデルに対して、筆者が呼ぶところの一括同定を期間を少しづつ更新して行う方法の方が、逐次同定より同定精度は良いであろう。

1 0. 最適設計

予測計算法は設計の一つの道具にはなるかも知れないが設計法自体ではない。設計行為とは人間の頭脳で成しうる複雑な“合成における最適化の行為”と見なせないだろうか。この最適化の評価関数や拘束条件が設計者の頭の中で数量的に曖昧である限り設計者の直感に大きく左右され主観的なものにならざるを得ない。そこで客観性のある数学的な最適化を電算機を用いて行う方法が研究課題となる。筆者は前述した最適制御理論の研究の副産物として、最適化の手法を応用できる可能性[19]を示した。しかしこれはあくまでも本質は制御問題であって最適設計ではなかった。つまり制御では入力を最適化するが、設計では系のパラメータを最適化する必要がある。おそらく最適設計においても二次形式の評価関数が基本になるであろうが、最適制御では線形の最小二乗法で解けるのに対して、最適設計では非線形の最小二乗法を解かなければならない困難があるだろう。またどちらも一般には不等式拘束条件が存在するが、おそらく非負最小二乗法に帰着してこれを考慮することができ、それほど困難なく解くことができると思われる。また冷暖房換気が最終的に実現するのは、ある物理環境ではなく、人体の快適感と健康であるから、人体の伝熱モデルを組み込んだシステムでの最適化[19]を考えるべきであり、この場合こうした使い方をする人体の伝熱モデルの研究が必要である。

1 1. 最後に

モデルとは当分野における一種の世界観である。この数学モデルによって斯界に大きな可能性が開けることが認識され、賛同する研究者が一人でも増え、共に大きな前進が成されることを願ってやまない。最後に紙幅の関係で表現、説明、参考文献や考慮範囲が十分ではなかったかもしれないことをお詫びする。

参考文献

- [1] 木村建一, “建築設備基礎理論演習”, 学敵社, 1970年7月初版に示される熱容量質点系
- [2] 宇田川光弘, “パソコンによる空気調和計算法”, オーム社 1986年12月初版
- [3] “Modeling of Solar Heating and Air Conditioning,” Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, Report NSF/RANN/SE/GI/34029/PR/72/4
- [4] 木村建一, 奥山博康, “熱回路網数値解析法による自然空調に関する研究”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1976年10月, p.333
- [5] 奥山博康, “熱回路網によるシミュレーションの理論と応用”, 空気調和衛生工学会学術論文集, 1983年10月, p.541
- [6] Julius T. Tou著, 中村嘉平, 伊藤正美, 松尾勉, 共訳, “現代制御理論”, コロナ社, 1969年第3版
- [7] 奥山博康, 木村建一, “建築物の熱回路系における推移行列と射影分解による時間数値積分公式”, 日本建築学会論文報告集, Vol.269, 1978年7月, p.127
- [8] 奥山博康, “熱回路網の状態方程式モデルによる最適制御理論, その3: 最適レギュレータの多変数入力系での適用例” 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1991年9月, p.871, (その他, その1は1989年10月の同梗概集のp.767, その2は1990年10月の同梗概集のp.745)
- [9] D.H.Owens, “Multivariable and Optimal Systems”, Academic Press, 1981, ISBN 0-12-531720-4
- [10] 奥山博康, “熱回路網の概念による各種の集中定数化法の統一”, 空調学会学術論文集, 1986年10月, p.277
- [11] 奥山博康, “換気回路網によるシミュレーションの理論と応用”, 空調学会学術論文集, 1983年10月, p.545
- [12] 奥山博康, “換気回路網のモデル化法とその非線型連立方程式の解法”, 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集, 1989年10月, p.729
- [13] 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”, 日本建築学会論文報告集, Vol.344, 1984年10月, p.103
- [14] 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, p.65
- [15] 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3: 多数室換気測定システムへの適用)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985年10月, p.409
- [16] 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, 1990, p.349
- [17] 奥山博康, “建築物の熱回路網モデルに関する理論的研究”, 1987年12月, 早稲田大学・学位論文
- [18] 加藤信介, 村上周三, Choi Dong Ho, “建物内外の空気流動に関するマクロ・ミクロ解析の統合 (その1他)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990年10月, p.507, 等
- [19] 奥山博康, “熱回路網モデルを用いた最適化理論による新しい定常熱負荷計算法の提案”, 空調学会講演論文集, 1992年, 10月, p.73