

熱回路網法による汎用熱移動計算プログラムの開発と検証

川 島 実
(技術研究所)
奥 山 博 康
(技術研究所)
小 林 昌 弘
(技術研究所)

§ 1. はじめに

現在、建築を取り巻く社会状況は資本の充実、情報化、生活レベルの向上が進展し、建物空間には高い快適性が要求されてきている。しかしまた、従来から取り組んできた省エネルギー・省コストの要求も同時に大きなものとして存在する。これらを同時に満足することは難しいものがあるが、建築環境の設計・開発に携わる側の技術的な興味は大きく、やりがいのあるところである。

今回開発したパソコン用汎用熱移動計算プログラム『NETS』(ネッツ)は、このような要求度の高い建築環境の分野にあって、定量的検討の必要な設計・開発業務に手軽に使うことのできる CAE (Computer Assisted Engineering) ツールである。プログラムには大型計算機用のものも用意されているが、本稿ではパソコン用のものを報告する。

§ 2. NETS システムの開発

NETS とは熱回路網法 (thermal NETWORK analysis by Shimizu) の文字を取ったもので、『熱』の発音をイメージするものとして名付けたものである。

2.1 開発の背景

建物の熱的な環境設計・設備設計・設備開発にあっては各種の伝熱計算が必要であるが、実際にこれを行なう場合には二つの問題点があった。

その第一は、解析理論上の問題である。一般的に空調負荷計算を行なうにはレスポンスファクター法、伝熱解析を行なうには有限要素法や境界要素法などが知られている。しかし、これらの解析手法は各種の伝熱を総合的に計算するには適していない。すなわち、実際の建物の伝熱系は「伝導」だけでなく、「輻射」や「移流」(換気等によって移動する熱)といった様々な伝熱形態の複合

したものとなっているが、これらを同時に計算のできる理論体系とはなっていない。

その第二は、実務上の問題である。設計・開発の業務の中では空調負荷計算をはじめ、表面温度の計算等、様々な計算要求が出てくるが、これらをデスクサイドで手軽に処理し、結果を得る計算システムがなかった。

2.2 開発目標

本システムは、①伝熱理論やコンピュータに詳しくない設計技術者が容易に使用できること、②熱回路網法理論の最大の特長である汎用性を十分活かしたプログラムとすることを開発の目標とした。特に、入力データの作成方法には工夫を行ない、設計技術者があたかも設計行為を行なうのと同様に熱移動計算が出来るよう考慮した。すなわち、計算対象の熱移動を考えたとき、窓や壁からの熱損失は室内外温度差によって決まり、換気口があれば空気の流通によって熱損失があることは容易に想像がつくことである。この熱移動のつながり方を入力データとし、建物の構成部材データを順次設計して行くことにより、対話形式で自動的に回路網モデルを構成し、計算結果が得られるシステムとするよう配慮した。

2.3 開発経過

熱回路網法の構築は、技術研究所の研究テーマとして1976年頃より開始され、1978年頃には一応の完成をみた。この理論を基礎とした NETS システムは、図-1のようにパソコンの発達とともに利用者の要望を組み込み、

	経過年									
	'76	'78	'80	'82	'84	'86	'88	'90		
理論	熱回路網法理論の構築									
第1次						Ver.1.0				
第2次						Ver.3.0				
第3次									Ver.4.1	

図-1 NETS システム開発経過

バージョンアップを行なってきた。

§ 3. 熱回路網の数学モデルと解法の概要

本計算プログラムの特長である汎用性と実用性は独自の数学モデルと解法によるものなので、ここに概要を述べる。この熱回路網モデルは、差分法、有限要素法、検査体積法などのモデルを広く包含する集中定数系の一般モデルとして位置づけられる。いずれの集中定数系モデルも、対象とする空間領域を分割し、各部分での熱流バランスを記



図-2 計算対象の冷凍倉庫柱部分

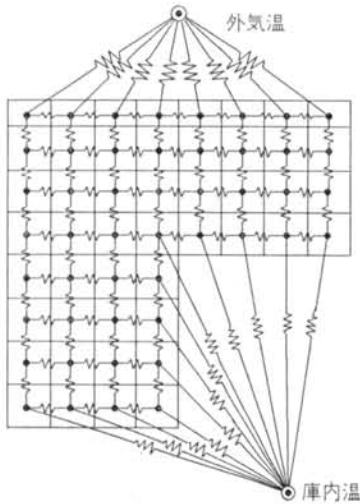


図-3 熱回路網計算モデル

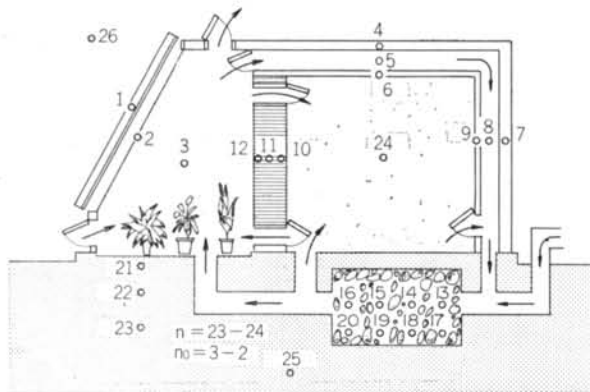


図-4 計算対象のソーラーハウス

述しているものとみなせる。この一般的な熱流バランスの基本式を説明するために、図-2のような簡単な柱部分の二次元熱伝導計算例を示す。

これは単純な伝導伝熱系であるが、外表面では日射熱や外気温が、内表面には室温が作用するとき、結露を起こさない断熱厚などを求めるため温度分布を計算する。この場合、実対象を図-3のように格子状の部分に分割し、各部分の熱容量は各々の重心に節点として集中する。非定常性を生み出す熱容量は節点に集中するので、節点間は定常伝熱とみなされ、熱貫流計算で熱コンダクタンスが定められる。一般に、未知数の温度を持つ節点が n 個あるとして、 i 番の節点での熱流バランスの式は次のような節点方程式で表わされる。右辺第1項は、 i 番節点につながるすべての節点との温度差に比例して流入する熱流であり、第2項は日射吸収により発熱する熱流を表わす。これらの差し引きが、左辺で表わされる温度上昇になる。

$$\sum_{j=1}^n m_{ij} \cdot \dot{x}_j = \sum_{j=1}^{n+n_0} c_{ij} \cdot (x_j - x_i) + \sum_{j=1}^{n_0} r_{ij} \cdot g_j \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 n : 未知数の温度の総節点数

n_0 : 既知数の温度(外気温など)の総節点数

m_{ij} : i 番節点に関する拡張熱容量

c_{ij} : j から i 節点への拡張熱コンダクタンス

x_j : j 番節点の温度

r_{ij} : j 番発熱源から i 節点への自由入力係数

g_j : j 番発熱源の発熱量(日射量の成分など)

ここでいう拡張熱コンダクタンスとは、普通は伝導だけにしか定義されていない熱コンダクタンスを、流体の流れによる熱流にまで拡張定義していることによる名称である。いろいろな伝熱形態に対して統一的に一つのパラメータ c_{ij} で記述することにより、一般的な数学モデルとすることができる。

式(1)右辺の総和記号は、一つの節点は他のすべての節点と結びついていることを定式化している。

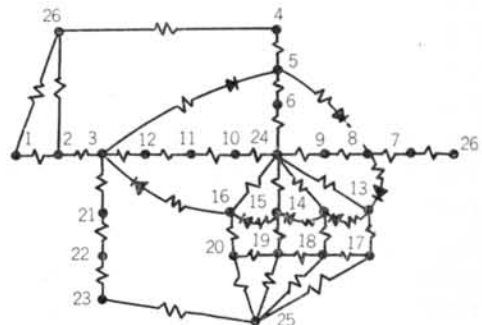


図-5 熱回路網計算モデル

これを完全システム記述と呼んでいるが、いかなる空間次元や形態の対象物も一般的に同じ方程式モデルで表わすことができ、計算プログラムの汎用性を実現している。こうした一般性を説明するために、図-4のような碎石蓄熱槽をもつパッシブソーラーハウスの例を挙げる。

図-5は、これを熱回路網モデルにしたものである。付設温室で温まった空気を二重壁の間を通して蓄熱槽に回し、碎石を温め、必要に応じ室内空気と循環して暖房する。この場合、モデル化の分割は必ずしも格子状ではなく、単に熱流バランスをみる体積(検査体積)である。空気の流れによる熱流に対しても伝導伝熱と同様に拡張熱コンダクタンスを定義し、ダイオードの記号で示している。流れによる拡張熱コンダクタンスは、上流から下流の節点に向けては0ではないが、逆向きは0である。なぜなら、上流は下流に影響されないからである。このように伝熱形態に限らず、計算対象物が図-2や図-4など、どのような空間的形状になろうとも同一の式(1)で表わせるので汎用性が実現できるわけである。

本熱回路網のもう一つの特徴は、伝熱系全体を一括して方程式モデルで表わし、システム理論の基本方程式の形にしているところにもある。 n 個の全節点について式(1)を立ててベクトル $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ などについて整理すれば、次の全体の常微分方程式が得られる。本数学モデルは、多数室系におけるガス濃度の拡散や水蒸気の拡散など、一般的な拡散系についても適用できるように考えられている。こうしたことから、 x_i という記号を用い、一般にこれを状態量、また次の式(2)を状態方程式とも呼ぶ。

$$M \cdot \dot{x} = C \cdot x + C_0 \cdot x_0 + R \cdot g = C \cdot x + f \quad \dots\dots(2)$$

x : 温度状態ベクトル(n)

x_0 : 規定温度入力ベクトル(n_0)

g : 発熱ベクトル(n_g)

M : 熱容量マトリクス($n \times n$)

C : 熱コンダクタンスマトリクス($n \times n$)

C_0 : 規定温度入力マトリクス($n \times n_0$)

R : 自由入力マトリクス($n \times n_g$)

ここで、数学的には境界条件、システム理論的には入力となる項をまとめて一つのベクトル f で表わしている。実際の計算では、 x について解くため、式(2)を時間積分しなければならない。本熱回路網理論においては、この時間積分法として普通行なわれている時間差分法等の近似解法ではなく、厳密な解析解¹⁾も与えている。しかし、この開発システムでは、使用するコンピュータの性能やアルゴリズムの単純さなどを考慮し、次式で示す

ような後退差分法を採用している。

$$x(k \cdot \Delta t) = \Phi \cdot x((k-1) \cdot \Delta t) + U_0 \cdot f(k \cdot \Delta t) \quad \dots(3)$$

ただし、 $\Phi = (M/\Delta t - C)^{-1} \cdot (M/\Delta t)$

$$U_0 = (M/\Delta t - C)^{-1}$$

ここに、 Φ は後退差分における推移行列、 U_0 は駆動行列と呼ぶ。式(3)は、 $(k-1) \cdot \Delta t$ から $k \cdot \Delta t$ タイムステップへの漸化式になっている。すなわち、まず全節点の初期温度から始めて、次々と各タイムステップでの外気温度や発熱量などの入力条件を与えながら、すべての節点の温度変化を計算していくことができる。この後退差分法が無条件安定であることは数学的に証明できるが¹⁾、これが実用上最も重要とされることである。

以上の理論の概要によって分かるように、本開発プログラム内の処理プロセスは大別して3つに分けられる。

- ① 数学モデル内のパラメータ m_{ij} , c_{ij} , r_{ij} などを自動的に、あるいは対話形式でジェネレートするプロセス (モデリング)
- ② 温度の時間変化を求めていくプロセス (シミュレーション)
- ③ 計算結果を見易く、理解し易い形で出力するプロセス (図表による出力)

前述したように、数学モデルは一般的適用性をもつ。また、モデルのパラメータ m_{ij} , c_{ij} , r_{ij} は建築技術者の基本知識である熱貫流計算法によっても求められるものであるが、たくさんのパラメータを逐一計算していくのは大変である。そこで、①のプロセスをユーザフレンドリーにし、③の出力プロセスまでも統合して備えたシステムを開発すれば有用である。

§ 4. NETS システム概要

4.1 プログラムの特長

本プログラムは、伝導(伝達)・換気・輻射の熱移動形態から成る伝熱系モデルの温度、熱移動量、熱流量等を動的に求めるものである。図-6に入出力例を示し、以下に特長を記す。

(1)あらゆる熱移動計算が可能

室温のシミュレーションはもとより、空調負荷計算、最適断熱厚の定量的検討、二次元壁体内温度分布、また輻射・換気を含む熱移動解析等、あらゆる熱移動計算に利用可能である。

(2)入力が非常に簡単

対話型で、ヘルプ機能・データチェック機能が充実しているため、間違いのないデータを簡単に作る事がで

きる。また、一度入力したデータは記憶され、入力の再
現が可能である。この機能を使うと、一部だけ部材を変
更するとき等に有効である。

(3) 充実した補助プログラムと組み込みデータ

計算に必要なアプリケーションプログラムがメニュー
に揃っている。また、部材の物性値等は、建築に使われ

るほとんどのものが登録されている。

(4) 計算は高速

解析計算のプログラムは、高速最適化された FORT-
RAN である。精度は大型計算機と全く同じであり、結
果を手にするまでの時間 TAT (Turn Around Time)
は大型機より改善されている。

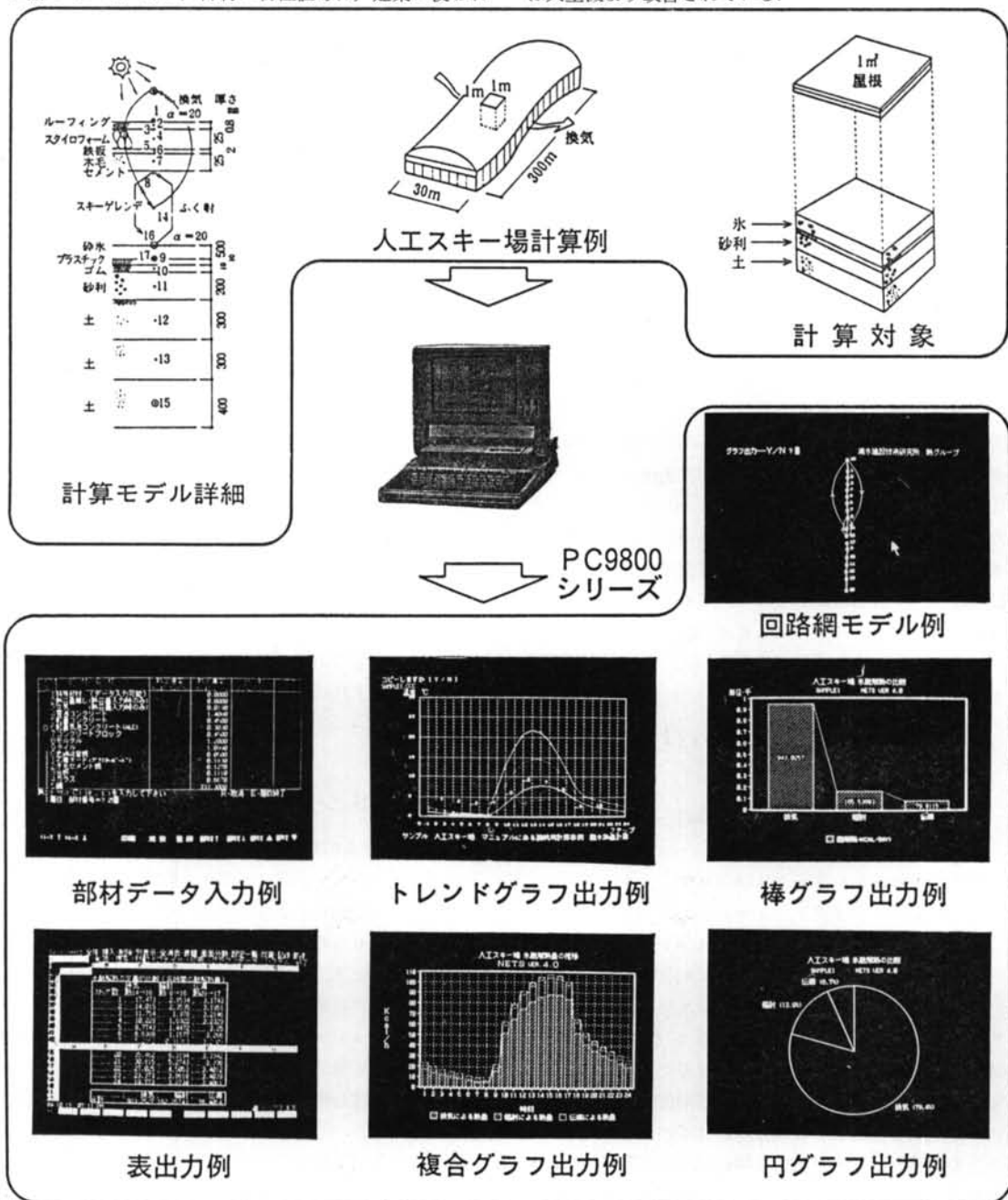


図-6 NETS システム入出力例

(5)プレゼンテーション用としても最適

計算結果をグラフ化して出力するためのプログラムと、表・グラフ作成ソフトへのデータ変換プログラムが用意されており、プレゼンテーション用として実用的である。

4.2 プログラムの柔軟性

プログラムは、様々な点で汎用性に富んだものとなっている。具体的には、以下の項目が挙げられる。

- ①計算対象がどのような大きさ、形状、次元をもつものでも適用可能
- ②伝導（伝達）・換気・輻射による伝熱を複合して計算が可能
- ③一連の外乱変動データによる連続計算はもとより、空調負荷計算によく使われる周期計算が可能



図一七 ハードウェア構成

④計算時間間隔は、分単位から時間単位まで任意に設定可能

⑤外乱状況（外気温・日射量等）、発生熱量、節点間の熱の伝わり易さ等、計算時に与えるデータはすべて変動値の使用が可能

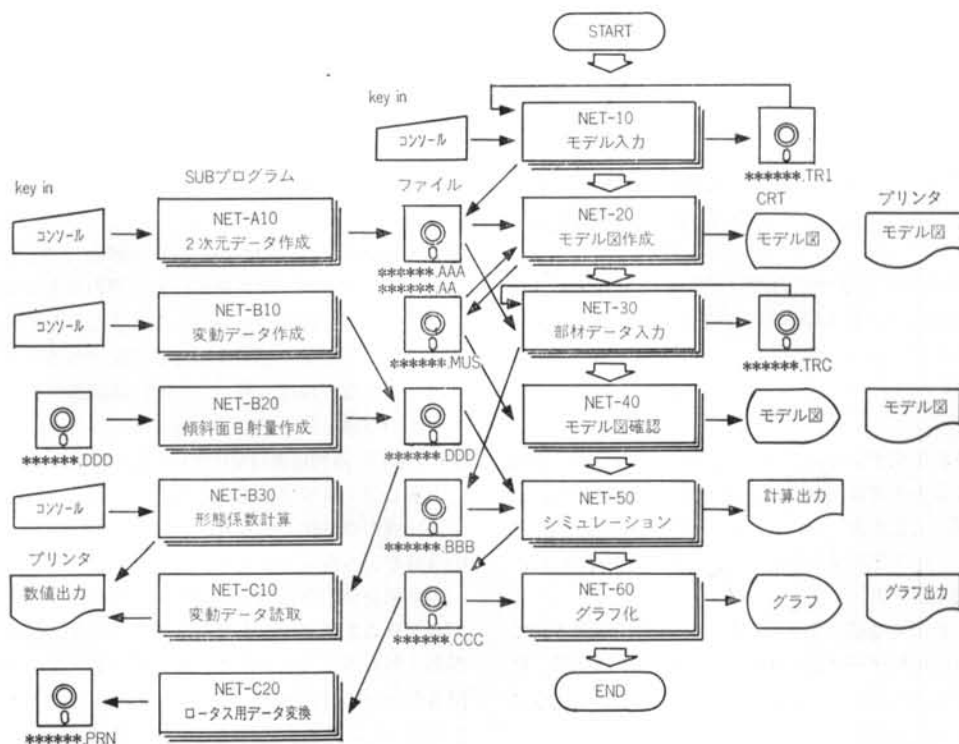
4.3 システム構成

4.3.1 ハードウェア構成

NETS のハードウェア構成は、汎用性という意味合いから最も数多く普及している NEC 社 PC-9800 のシリーズ、またはその互換シリーズとした。基本的な構成を図一七に示す。メモリーが640 キロバイト、フロッピーディスクドライブが2台以上ある一般的な機種であれば、ラップトップ型でも、32ビット機でも使用可能である。その他、画面コピーのできる標準タイプのプリンタが必要である。マウスがあるとモデル図が描けるため、入力ミス防止に効果がある。さらに、増設のフロッピーディスク、ハードディスクがあると入出力がより便利になり、演算用副プロセッサを組み込むと計算スピードが向上する。

4.3.2 プログラム構成

ソフトウェアの構成を図一八に示す。NETS は、以



図一八 ソフトウェア・データ構成

下に示す独立した12本のプログラムによって構成されている。プログラムは大きく分けて、(1)計算の流れにそって順次走らせる一連のメインプログラムと、(2)補助的なプログラムとに分けられる。すべてのプログラムは、即実行可能な形式で1枚のフロッピーディスクに納められている。

(1)メインプログラム群

- ①NET-10：自分で作成したモデル図を参照しながら関連している節点番号とその関係（伝導・換気・輻射）のデータを入力するプログラム（必須）
- ②NET-20：NET-10で作ったデータを確認するため画面上にモデル図を描くプログラム（マウス必要）
- ③NET-30：モデルの構成部材、計算方法、データの内容、出力の内容を入力するプログラム（必須）
- ④NET-40：モデル図を描き、データの入力状況を確認するプログラム（マウス必要）
- ⑤NET-50：熱回路網の解析プログラム（必須）
- ⑥NET-60：出力結果を、折れ線グラフまたは棒グラフにして出力するプログラム

(2)補助プログラム群

- ⑦NET-A10：二次元の伝導系だけに限ったモデルを自動作成するプログラム
- ⑧NET-B10：外乱変動データのファイルを作成するプログラム
- ⑨NET-B20：標準気象データから傾斜面全天日射量を求めるプログラム
- ⑩NET-B30：面対面の形態係数を求めるプログラム
- ⑪NET-C10：NET-B10で作った自作データを確認するプログラム
- ⑫NET-C20：グラフ出力ファイルを表計算・グラフ作成統合ソフト LOTUS 1-2-3 用に変換するプログラム

4.3.3 計算データ・組み込みデータ構成

(1)計算データ

利用者が作成する計算データは、図-8に示すようにファイル拡張子で管理される。計算対象一つに対し、最後まで同一名を入力すれば良い。未習熟利用者のために「NETS データ管理シート」を作成し標準化を図った。

(2)標準気象データ

全国25都市の標準気象データがディスクに用意されている。標準気象データには1時間毎の年間の外気温、日射量等が記憶されており、利用者は必要に応じて使うことができる。

(3)建築部材の熱物性値

伝熱計算に必須な部材の熱物性値（熱伝導率、比熱、密度）が約120個登録されている。新規の物性値はワープロの単語登録のように登録、削除が可能である。

(4)その他のデータ

都市の緯度、経度、部材の日射吸収率、地面の日射反射率等は、入力時点でヘルプキーを押すと参照値が出てくるよう組み込まれている。

4.4 利用範囲

NETS ではパソコン機能上から、以下の計算は適用範囲外として制限を設けている。

- ①アトリウム等の自然対流を伴う室内温度分布計算
- ②節点数150を越える計算モデル

上記①については、これを可能とする換気と熱の回路網連成プログラムが大型計算機に用意されている。現在のところ、計算速度・容量的にパソコンでは無理と判断している。②についてはパソコンの容量の問題であり、上位機種が一般的に使われるようになった時点で節点数を増やす予定である。

§ 5. 計算モデル

NETS でのモデル化とは、

(i)実対象の各部材をある程度の厚み・大きさで区切り、各々その重心に熱容量を集中して節点とする、

(ii)節点間の熱的つながりを定める、

という作業により、熱容量節点系と呼ぶモデルを作ることを行う。ここでの熱的つながりには、伝導（伝達）・換気・輻射によるものがある。空間的次元にとらわれることなく、熱移動現象を単純に節点間のつながりとして捉え、回路網を作れば良い。このようなことから、本方式は様々な実対象に柔軟に対応が可能である。

計算を行なうには、利用者が熱回路網法の概念と計算モデルの作成方法を正しく理解している必要がある。通常、NETS の利用者は熱回路網法に馴染みがないことを考慮し、マニュアルに以下の項目を詳しく説明し、モデル作成の標準化を図った。

(1)計算モデル作成の決まり

実対象を熱回路網の計算モデルに抽象化する作業は本プログラムを利用する上で最も重要であり、様々な方法が考えられるところである。そこで、モデル化の統一を図るため11項目にわたる「計算モデル作成時の決まり」を設定した。また、具体的なモデル作成例を数多く挙げてマニュアルに説明した。

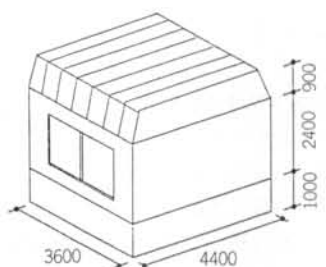


図-9 計算対象の実験ユニット

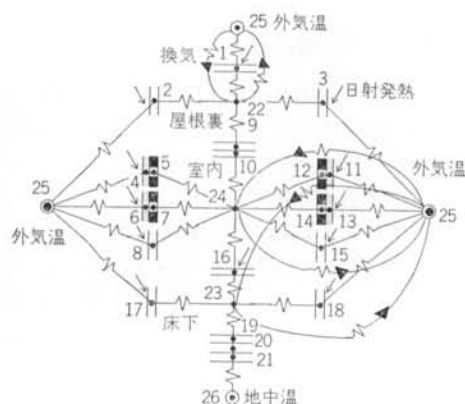


図-10 熱回路網計算モデル

(2)モデル図作成の決まり

パソコンにデータを入力する際には、計算のモデル図が必要である。いったん入力したモデルは、パソコン上でも図を描いて入力データを確認することができる。誰が作成したモデルでも同様の図となる必要があるため、モデル図作成記号を設定して統一を図った。

§ 6. プログラムの適用例と検証

以下に、実測値との比較を行なった検証例を示す。

(1)室温変動シミュレーションの検証

暖房機器や壁、窓の断熱性能を実験するためのコンクリート製ユニット(図-9)がある。この実験ユニットをモデル化すると図-10のように表現できる。ここでは、ユニットの室温変動実測値と計算値の比較を行なった。検証結果を図-11に示す。計算値と実測した室温は極めてよく合致し、建物の性状を良く捉えていることが分かる。

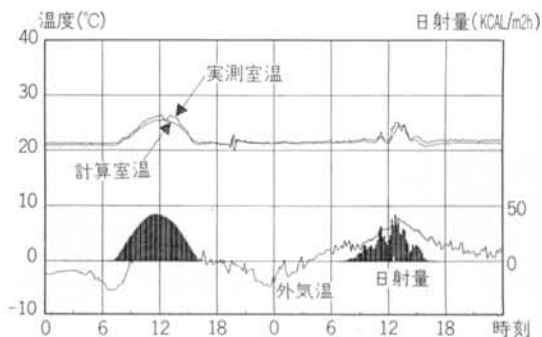


図-11 外乱とユニット室温の実測・計算値の比較

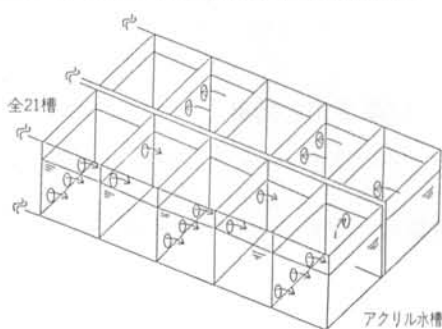


図-12 計算対象の実験水槽

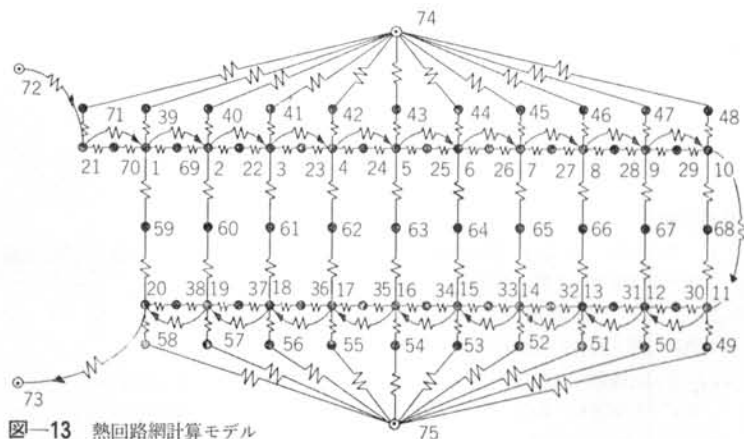


図-13 熱回路網計算モデル

(2)蓄熱槽のシミュレーション例

蓄熱槽の性能を検証するため、モデル水槽(図-12)の実験を行なった。回路網のモデル化は図-13のように表現できる。実験では、最初に13°Cの水を貯めておく。6°Cの冷水を注入し冷水蓄熱実験を行なった後、引き続き水の流れの向きを逆にして、冷水の取り出しを行なった。実測した水槽の温度変化と計算値を図-14に示す。時々刻々の計算した水温変化は実測値と良く一致しており、実現象の熱的性状を良く捉えていることが分かる。

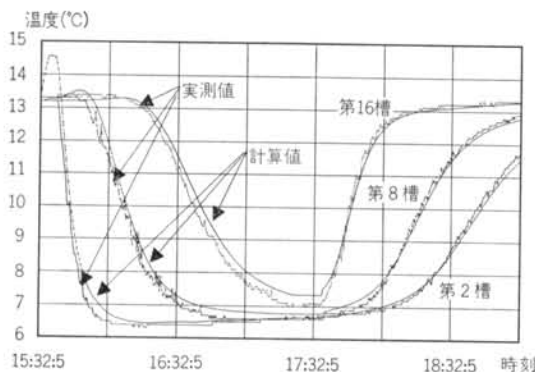


図-14 水温の実測・計算値の比較

§ 7. 成果活用と効果

本システム活用のメリットとしては、以下の項目が挙げられる。

- (1) 計算コスト低減——パソコン利用により CPU コストが無料
- (2) 施工コスト低減——過剰設計仕様の適正化によるコスト低減が可能
- (3) 設計能力向上——勘や経験でない定量的設計手法を実現
- (4) 設計時間短縮——複雑な計算を机上にて手軽に実行

(5) 建物品質の向上——最適設計による高品質の確保

NETS システムは当社の各部署にて、基本設計・実施設計・施工・維持管理の各ステップで利用されている。本システムを使用した検討により、過剰仕様チェックや設計の修正など容易にでき、建物の品質確保や施工コストの低減などで成果を上げている。また、実験結果の比較検証ができ、研究用としても成果を挙げている。

§ 8. 今後の展開と課題

NETS システムの社内展開のため、本社・支店で説明会を多数開催してきた。また、利用者の質問を反映して、「ユーザーズインフォメーション」を発行し、モデル作成方法の説明や間違え易い点のフォローを行ってきた。利用者の拡大に伴い、利用者間での情報交換のため、既利用者リスト・計算事例リストも配布している。

今後も、これらは続行する必要がある。また、社外からもシステムの利用希望があるため、販売体制の整備や NETS を使用する受託計算業務の体制を整えることを検討している。

本システムが、熱に関する環境設計のツールとして広く利用され、建物の品質向上に貢献することを願っている。

<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” 清水建設研究報告別冊 第26号 (1989年6月) (同内容は早稲田大学建築環境工学の学位論文、1987年12月)
- 2) 川島実：“熱回路網法によるパソコン用動的熱移動解析プログラム NETS Ver.4.0 ユーザーズマニュアル” 清水建設技研資料 89-01 (1989年7月)
- 3) 奥山、藤井、小林、川島、益子、他：“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1)～(その6)” 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1985年～1990年)
- 4) “回路網プロジェクト中間報告書 回路網法による熱移動換気シミュレーション” 清水建設技術研究所研究報告書 LR-84-5549 (1984年12月)
- 5) “熱と換気についての回路網数値解析” 清水建設技術研究所テクニカルリーフレット No.24
- 6) “シミズ建築環境評価システム 回路網による熱換気シミュレーション” 清水建設技術研究所パンフレット