

パッケージフローモデルによる熱の流れ解析

石黒 美佐子^{†1}, 松岡 浩^{†2}, 丸繁 卓彦^{†3}

†1 茨城大学工学部, †2 科学技術庁, †3 茨城大学大学院理工学研究科

“パッケージフローモデル”(PFM) は様々なタイプのシステムの動特性を直感的に理解するための新しい簡単なシミュレーションモデルである。PFM は基本的には科学技術分野でよく現れる畳み積分に基礎を置いている。PFM は、従来、偏微分方程式を差分法等で精密に離散化してきた物理現象をマクロ的な視点で評価しようとしている。PFM は原子炉システムの動的振舞いを直感的に解析することによって動機づけられ、既にこれに成功した。今回、本手法の概念を分かり易いものにするため、身近なセントラルヒーティングの熱の流れ解析に適用する。その上、給湯停止や給湯量の変化を取り扱うために、流速の停止や可変流速を含む系への PFM ネットワークの新たな適用方法を示した。

Heat Flow Analysis by Package Flow Model

Misako ISHIGURO^{†1}, Hiroshi MATSUOKA^{†2}, and Takuhiko MARUSHIGE^{†3}

†1 Faculty of Engineering, Ibaraki University, †2 Science and Technology Agency,
†3 Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

“Package Flow Model” (PFM) is a simple simulation model for intuitive understanding of various types of system dynamics. PFM is basically a model for simulating the system behavior based on the convolution integral which often appears in scientific calculations. PFM attempts to evaluate the physical processes from a macroscopic point of view, though they have usually been solved by finely discretized finite difference method, etc. PFM was first motivated by an intuitive simulation of the dynamic behavior of a nuclear reactor system and it has been successful. In this paper, the method is applied to a usual heat flow analysis of a central heating system to easily understand the concept of PFM. And we present an example that the PFMs network can deal with a system involving zero-velocity or variable velocity which are required to model the cases when the water supply is on and off, or the amount of water is changed.

1. はじめに

従来から、熱水力シミュレーション等においては、「システム全体を多数のノードに分割し、各ノードで質量や運動量の保存を表す偏微分(差分)方程式を立て、さらに様々なタイプのパラメータを含む実験式を導入し、それらを組み合わせて解く」という方法¹⁾で多大な成果を挙げた。この方法の欠点は、計算モデルが複雑過ぎるためシステム挙動の因果関係をモデルを介して直感的に把握できなくなっていることである。ここで、システムの動的挙動を直感的に考察でき、学習能力を持つ新しい手法としてパッケージフローモデル (Package Flow Model, PFM)^{2,3)}を提案した。

PFM シミュレーションモデルは、特に応答の“時間遅れ”に着目し、現実のプロセスを直接考察する代わりに、原理的に同じ時間遅れを生じる簡単な別

のメカニズムに置換え、これを考察する。

多くのシステムは質量やエネルギーなど何らかの“実体”が流れていくシステムとして理解できる。この場合、システムの過渡変化はその流れの変動に対応している。システム全体の流れは、通常、いくつかの物理ステージに区分でき、各ステージが数個の PFM に置換えられる。各々の PFM は、パッケージの落下密度関数と(仮想)流れの流速、の2つのパラメータに支配される1つのビジュアルなメカニズムで表示される。その分野の専門家ならその“fuzzy”イメージを経験的に描くことができる。

一方、1つの PFM による計算は学習付きのパーセプトロン型ニューラルネットワークによる計算と等価となるので³⁾、全体システムは、結局、PFM ネットワークで表現され、その動特性解析は、回帰型ニューラルネットワークに置換えられて計算できる。

PFMは、原子炉システムの動的振舞いを直感的に解析することによって動機づけられ、既にこれに成功している²⁾。PFMはこれまでのモデルと非常に異なるものであるため、まず、第2章で、PFMについての筆者らの過去の研究結果を概説し、その概念と特徴を明らかにする。第3章では、PFMのセントラルヒーティングの熱の流れ解析への適用方法と計算結果を示す。特に、これまで我々が取扱って来なかった流れが停止している場合や流速が可変となる場合、及び時定数の異なる系への適用に重点を置く。

2. パッケージフローモデルの概念と応用

2.1 パッケージフローモデルとは

質量、エネルギー、熱のように保存則に支配されるある実体粒子の流れシステムを取上げる。Fig.1に示すような仮想流れのある真っ直ぐなパイプを考える。①注目している実体粒子がある与えられた“収集率”で集まり、②一定数 N のパッケージに均等に配分される。③それがあるパターン分布“落下密度関数” $w(x)$ でパイプ内の仮想流れに落とされる。④落下パッケージは仮想流れに乗って出口に向かって漂流していく。ここで仮想流れとは、実際の流れでもよいし、単なる時間の流れでもよい。以下を仮定する。

- (1) 仮想流れの流速 $v(\tau)$ は、パイプ内では同一であるが、落下時刻 τ によって変化してもよい。
- (2) 流れが x からある不変な Δx を進むごとに、 N 個のパッケージは分布 $w(x)$ に従って流れに落とさ

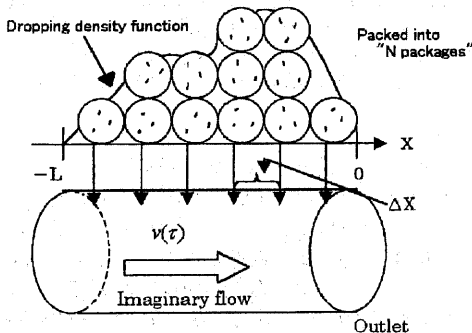


図1 パッケージフローモデルの概念
Fig.1 Concept of package flow model

れる。このとき時間間隔は $\Delta t = \Delta x / v(\tau)$ 。

- (3) 同じ時刻に落ちたパッケージは同数の粒子を含む。システム全体の流れは、いくつかの物理ステージに区分できる。シミュレーションモデルは現実のシステム特性のうち応答の時間遅れに注目し、ステージごとに実体粒子の次の量を計算する。

収集率 $q(t)$: 単位時間当りに集まる粒子の量

流出率 $f(t)$: 単位時間当りに粒子がパイプ出口から流出し、次のステージに渡る量(フラックスに対応)

残留量 $R(t)$: そのチューブに残る粒子の量 (エンタルピーに対応)

Fig.2には過去から現在に至る漂流パッケージの位置を示す。流出率はパイプの出口で過去から現在までの間に収集されたパッケージの総和をとることによって得られる。これは、一種の畳込み積分と見なすことができよう。結局、時刻 t_c における流出率は次式によって計算される。

$$f(t_c) = \sum_{m=0}^r w_m q(t_{c-m}) \Delta \tau(t_{c-m}) / \Delta \tau(t_c) \\ = \sum_{m=0}^r w_m q(t_{c-m}) v(t_c) / v(t_{c-m}). \quad (1)$$

$w_m = w(t_{c-m})$ で、現時刻 t_c で流出するパッケージのうち m ステップ前の t_{c-m} に落下したものの比率(重み)を表す。 $q(t_{c-m}) \Delta \tau(t_{c-m})$ は収集率で、落下した全パッケージに含まれる粒子の数(エネルギー量)とも言える。同じく、残留量は

$$R(t_c) = \sum_{m=0}^r w'_m q(t_{c-m}) \Delta \tau(t_{c-m}), \quad (2)$$

w'_m は $w(x)$ の累積密度関数 $F(x)$ から得られる。

Fig.2から、落下密度関数 $w(x)$ は、流速が変化しなければ、事象発生後、次のステージにそのエネルギーが伝達するまでの時間遅れの分布であると理解できる。時間遅れがない場合には右端にピークがある δ -関数となる。

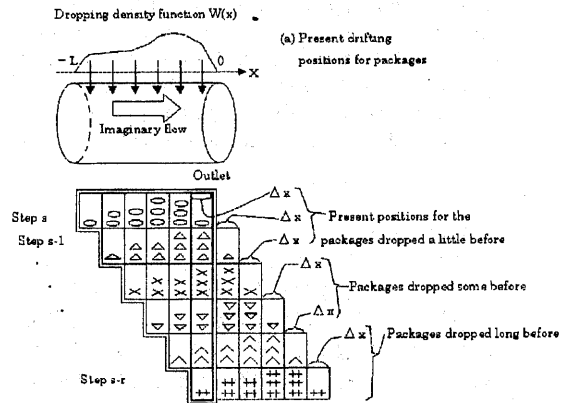


図2 流出パッケージの分布
Fig.2 Distribution of flow-out packages

2.2 PFMとAIパラダイム

PFMは畳込み積分に基づいた計算なので、システム制御などいろいろな応用分野が期待できる。仮想流れ流速と落下密度関数が入力データとして与えられれば、畳込み積分によって、流出率と残留量が

出力される(Fig.3). 流出率等はまた次の物理ステージでの収集率として使われる. システムの動的振舞いを, 一旦 PFM ネットワークで表現できれば, いくつかの AI 的手法の導入が可能となる.

筆者らの研究は, 松岡による PFM による原子炉システムの各物理ステージでの動的な現象をファジイシミュレーションで試みることから始まった^{9,10}. 落下密度関数をファジイ曲線で表現し, メンバシップ関数を対応させて, パッケージの落下時刻をファジイ推論で求めるという方法である.

一方, PFM は多くの物理現象を統一的に取扱えるという特徴から, その性質はオブジェクト指向におけるクラス概念と容易に対応がつかう. セントラルヒーティングシステムの熱の流れ解析を事例として, オブジェクト指向プログラミング化できることを示した⁹.

次に, PFM モデルの背後にある数学的関係を明確化した上で, ニューラルネットワーク表現に置換えられることを示した. Fig.4 の下方に示す1つの線形ニューロンを考える. 入力を $q(\tau_{c-m})/v(\tau_{c-m})$ とおき, w_m や w'_m を m 番目の入力のリ重みと考えれば, 式(1),(2) の計算は線形ニューロンの計算と等価である⁹. したがって, システムが複数の PFM からなるネットワークで表現されていけば, PFM 法の計算は, 過去のデータを次々に食って前に進むフィードフォワード型の回帰型ニューラルネットワークの計算で置換えられる⁹.

さて, ニューラルネットワークの重みは, “時間遅れ分布” に対応しており, 物理的な法則や工学的な性質から決まる. その分野の専門家であればラフなグラフを描くのは容易なことであろう. これを線形補間して $w(x)$ を得る.

重み w_m , $m = 0, 1, 2, \dots, r$ を実験値や別の計算コードからの結果を教師データとして学習させることができる. 教師データには多かれ少なかれエラーが含まれるものである. 教師データにエラーがあるときの学習について, 目的関数の形, どの程度目的関数を小さくすべきか, 局所ミニマムの可能性, などの点から論じ1つのアルゴリズムを提案した⁹.



{ Fuzzy, Neural Network, Object-oriented Program }

図3 PFM と AI パラダイム
Fig.3 PFM v.s. AI paradigm

Dropping density function
in Package Flow Model

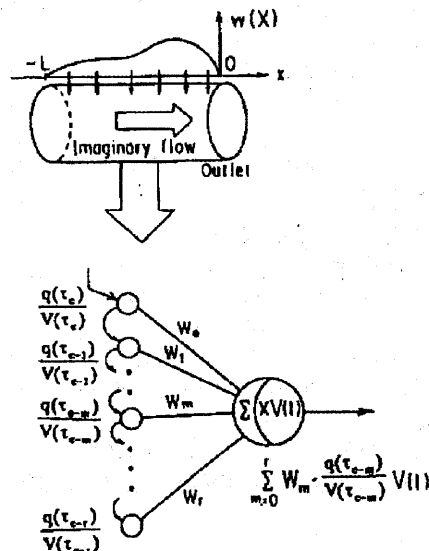


図4 PFM に対応する人工ニューロン

Fig.4 Artificial neuron corresponding to a PFM

2.3 原子炉システムの熱流動解析への応用

原子炉システムの全体の動特性シミュレーションとして, 加圧水型原子炉(PWR)が 100%出力で定常運転していたとき, 突然, 正, または負の反応度が加わったときの過渡変化の計算を行った²⁰. 反応度とは, 実効増倍係数 $K_{eff} = 1$ を臨界状態としたときの K_{eff} の増減比を言う.

原子炉システムは“エネルギー”という実体が核分裂によって生成され, 原子炉炉心中の燃料から原子炉中に流れる冷却材に移行し, それが冷却材の循環ループを回って蒸気発生器に到達し, そこで多くの熱を失い, 再び原子炉にもどる. この一連のエネルギーの輸送過程は, 核分裂によるエネルギー発生, 燃料中で熱エネルギーの輸送, 原子炉中での熱輸送, 冷却ループ中の熱輸送の4つの物理ステージに区分できる. 各ステージの物理現象は, 核分裂, 熱伝導, 熱伝達, 物質移動などその機構が全く異なるものであるが, システムとしての時間遅れに注目する PFM では, 全てのステージを同じメカニズムの PFM で記述することができる. ここでは, 原子炉システムは, 7つの PFM で構成されたネットワークでモデル化されている. 各 PFM パイプの上に描かれているのは, 各々の落下密度関数の形である. 先行する PFM の流出率(出力)に基づく計算値が後続の PFM の収集率(入力)となる.

シミュレーションは, 定常状態で稼動していると

き、反応度 $+0.001K_{eff}$, $+0.0005K_{eff}$, $-0.0005K_{eff}$ を引加した3ケースについて行われ、① 実効増倍係数 K_{eff} , ② 核分裂率 ③ 燃料エンタルピーの過渡変化が計算された。これらの結果は、日本原子力研究所で開発された原子力船シミュレータでの計算結果とよく一致している²⁾。

3. セントラルヒーティングシステムへの応用

3.1 給湯システムへの応用

現象理解の容易さから、解析は Fig.5 で示すセントラルヒーティングシステムの点線内で示すような給湯システムから始める。このシステムは

- (1)時々給湯を行う。給湯量は変えられる。
- (2)給湯で失った湯と同量の水がボイラータンクに補給される。
- (3)タンクの湯の温度制御を行い一定に保つ。
- (4)タンク、給湯パイプからの熱の漏れを考慮する。

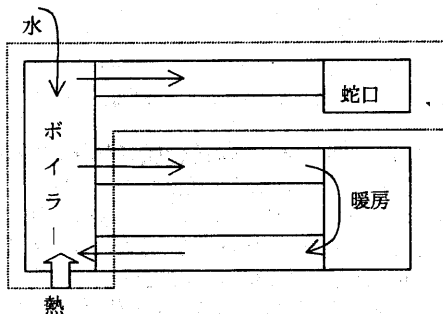


図5 セントラルヒーティングシステム
Fig.5 Central heating system

熱の流れの計算は、タンク部分と給湯パイプに分割して行う。タンクの湯の温度 $Tb(t)$ は通常の熱の収支式から、ボイラーによる加熱、給湯パイプへの湯の流出、水の補給、タンクから外界への熱の漏れなどを考慮して求める。

給湯パイプ部分には PFM を適用する。Fig.7 で示すように、給湯パイプへの熱の流入用の PFM_1 とパイプから外界への熱の漏れ用の PFM_2 の2つを用意する。両者の流出率から以下のように蛇口の湯の温度 (パイプ出口温度) を計算する。

まず、熱の流入に対する“収集率”は、給湯パイプに流入する熱エネルギーにあたる。給水量 $W(t)$ / 秒 だけボイラータンクから湯が流入するものとして、良く知られた熱量と温度の関係式を使って、湯の温度 $Tb(t)$ から熱量 / 秒を計算する：

$$q_1(t_n) = \rho C_p W(t_n) (Tb(t_n) - 273.15). \quad (3)$$

ρ, C_p は湯の密度と定圧比熱を示す。漏れに関する

“収集率”は、パイプに流入する熱エネルギーのうち、パイプの表面から漏れる量に当る。漏れ係数 k_1 を使って1次元熱伝導から

$$q_2(t_n) = -k_1 (Tb(t_n) \times s - Tex). \quad (4)$$

ここで $s (=0.997)$ はパイプ出口での 0.3% の温度低下を考慮した調整値、 Tex は外界の温度を表す。

q_1 と PFM_1 の落下関数を使って式(1)から熱の流入に対応した“流出率” f_1 が計算できる。漏れに対応した流出率 f_2 も PFM_2 の落下関数から同様に計算する。 f_1 は蛇口から流出する熱エネルギーに当る。

f_2 はそのマイナス効果を表す。蛇口での湯の温度は $Tw(t_n) = (f_1 + f_2) / (\rho C_p W(t_n))$. (5)

この場合 PFM における“仮想流れの流速”は、現実の給湯パイプ内での湯の流速となる。これは給湯量によって決まる値であるが、給湯停止時の流速についてはゼロである。

“落下密度関数”の形は、主流が出口に達するまでのステップ数 (r^*) から直感的に考えて Fig.6 のように定める。熱の流入に対する PFM_1 では主流をピークとした山型で、これは、ある時点で流入した熱は、主流が到達するまでの時間に合前後してそれより早いもの (右側)、遅いもの (左側) と広がりをもって伝達するというを意味する。流体力学では対流拡散と呼ばれるものである。主流より右側 (点線より右側) が現実のパイプに対応し、左側は仮想的に追加した部分である。

この計算では $r = 28$, $r^* = 19$ である。パイプからの漏れに関する PFM_2 の落下関数は、時間の影響を考慮して右上がりの分布とした。ここでは、 $\Delta x = 0.5$, $v = 0.4615$ を仮定する。

タンクからのエネルギー流入 (収集率)

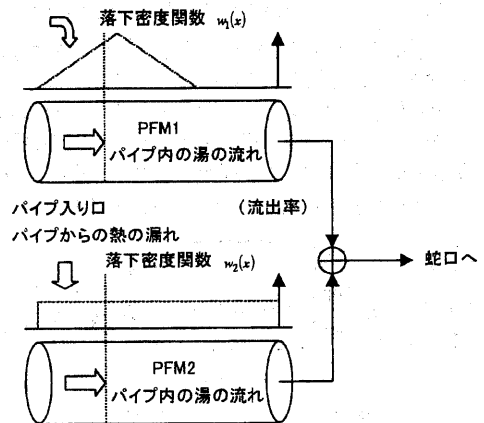


図6 落下密度関数
Fig.6 Dropping density functions

Fig.7 一定量の給湯 $W_0 = 1308 \times 10^{-4} (m^3 / s)$ が絶えず行われているという条件での蛇口の湯の温度を計算した結果を示す。ボイラータンクの湯の温度 (T_b)、蛇口の湯の温度 (T_w) を $\Delta\tau_0 = 1.2$ の間隔で計算した結果を示す。過去から時刻0までは同じ条件での熱伝導方程式に基づく差分法の計算結果、それ以降がPFMによるものである。両者は0.3%の誤差で一致する。流出率 (式(1)) の計算には、過去のタイムステップでの $q(t_{c-m})$ と $\Delta\tau(t_{c-m})$ か $v(t_{c-m})$ の値が必要となるが、差分法での計算結果を初期値として与えている。

給湯量に変化があるときは、流れが Δx 進むのに要する時間 $\Delta\tau_1$ を可変とし、給湯量 W から次のように計算する。ここで s は配管の断面積を示す。

$$v = W / (s\Delta\tau_0), \quad \Delta\tau_1 = \Delta x / v \quad (6)$$

この $\Delta\tau_1$ を式(1)に代入し、流出率を求める。

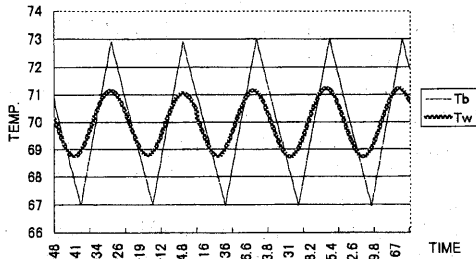


図7 給湯量が一定のときの計算結果

Fig.7 Computing result for constant water supply

3.2 給湯停止時の取扱い

給湯停止時には、給湯が行われる最初のステップまでを1つの時間刻み $\Delta\tau$ とし、 $\Delta x / \Delta\tau$ から流速を求める。PFMの定義では仮想流れが Δx 進むことに流出率等の計算を行う。従って、ボイラーの温度計算を除いて、熱の流れの計算をスキップする。通常のタイムステップを n_1 で数え、一定の時間刻み $\Delta\tau_0$ を与える。

これとは別のPFMに固有なステップを n で数え、可変な時間刻み $\Delta\tau_1$ と考える。ボイラーから給湯パイプへの熱の流入量/秒は $\Delta\tau_1$ 間にならして考える。つまり、収集率 (式(3)) には $\Delta\tau_0 / \Delta\tau_1$ が掛けられる。

3.3 暖房・給湯システム

Fig.5 で示した給湯と空調を同時に行うセントラルヒーティングシステムを扱う。熱の流れシステムを Fig.8 で示すように PFM₁ ~ PFM₆ の6本のPFMのネットワークで表現する。

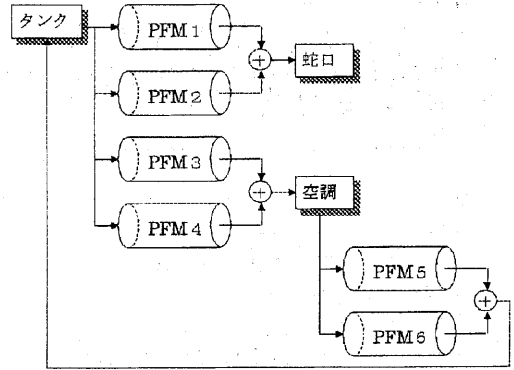


図8 セントラルヒーティングシステムのための PFM ネットワーク

Fig.8 PFMs network for a central heating system

PFM₁, PFM₃, PFM₅ は、給湯、空調システムの往路と復路のパイプへ流入する熱量の計算に、PFM₂, PFM₄, PFM₆ は熱の漏れの計算に用いる。この場合の収集率は、PFM₃ ではボイラータンクからの湯 (熱) の流入を、PFM₅ では暖房によって熱が奪われた後の熱の流入、つまり、PFM₅ の流出率から暖房による熱の損失を引いたものとなる。落下密度関数の形は、流入熱量と熱の漏れについてそれぞれ Fig.6 で示した2種類を用いる。

流速は、給湯と空調システムでは異なることから、一定の $\Delta\tau_0$ で同期をとって計算できるように PFM の空間メッシュ幅 Δx を調整している。例えば、PFM₁ と PFM₃ の流速をそれぞれ v_1 と v_3 、メッシュ幅を Δx_1 と Δx_3 、メッシュ数を r_1 と r_3 、パイプ長を同一の L とするならば、次の関係が成り立つ。

$$\Delta\tau_0 = \Delta x_1 / v_1 = \Delta x_3 / v_3, \quad (7)$$

$$r_1 \Delta x_1 = r_3 \Delta x_3 = (L), \quad (8)$$

これより

$$r_3 = (v_3 / v_1) r_1. \quad (9)$$

Fig.9 には、Fig.5 のセントラルヒーティングシステムで、一定量の給湯 $W (m^3 / s)$ が行われ、一定の熱量 Q が暖房で奪われていると仮定したときのボイラーの温度 (T_b)、蛇口の湯の温度 (T_w)、空調入口の湯の温度 (T_a)、給湯出口の湯の温度 (T_r) についての計算結果を示す。ここでは

$$r_1 = 70, \quad r_3 = 175,$$

$$v_1 = 0.4165, \quad v_3 = 1/6,$$

$$W = 1.308 \times 10^{-4}, \quad Q = 2 \times 10^6.$$

と置いた図で見るとおり差分法と PFM の計算結果はよく一致している。

Fig.10 には、給湯 W を 2.4 秒間行い 9.6 秒間停止

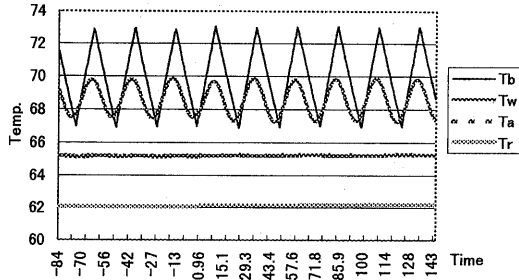


図9 給湯が一定なときのセントラルヒーティングシステムの計算結果

Fig.9 Computing result for the central heating system when constant water supply

することを繰り返したときの計算結果を示す。なお、給湯システムは、3.2節と同様の計算方法を用いた

4. おわりに

システム動特性を直感的に理解するための新しいシミュレーションモデルとしてパッケージフローモデル(PFM)の概念を述べた

システムの動的物理現象をPFMのネットワーク図で一旦表現できれば、ファジィ、ニューラルネットワーク、オブジェクト指向などAIパラダイムを導入できることを示した。PFMまたは複数のPFMの表現としてニューラルネットワークを導入し、システムの動特性解析は対応するニューラルネットワークの計算に置き換えて行えることを示した。1つのPFMを1つのニューロンに対応させ、PFMの落下密度関数からニューラルネットワークの重みを決める。この意味においてPFMでは落下密度関数の形が最も重要なパラメータである。関数の形は学習によって改善することができる。

PFMのセントラルヒーティングの熱の流れ解析への応用について次のような知見を得た：

- (1) PFMの重要なパラメータである落下密度関数、仮想流れの速度、収集率、流出率などについて本解析に適用された数値や形について具体的に示すとともに、それらの意味するところを明らかにした。
- (2) 給湯量の変化に伴う可変速度の取扱いも示した。
- (3) 給湯停止時の取り扱いについても記述し、流れが停止しているときにも適用できることを示した。
- (4) セントラルヒーティングの熱の流れを複数PFMからなるネットワークを用いて解析できることを示した。
- (5) PFMによるこれらの計算結果は熱伝導方程式に基づく差分法での計算に比べてよい一致を得た。
- (6) 今回、PFMによる計算に到らなかったボイラー

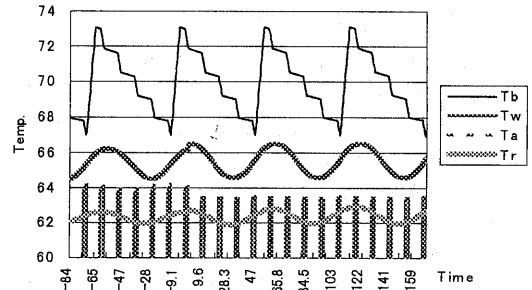


図10 給湯が断続的なときのセントラルヒーティングシステムの計算結果

Fig.10 Computing result for the central heating system when water supply on and off

タンクと空調部分についてもPFMによるモデル化が図れる見込みである。

参考文献

- 1) Ranson, V.H., et al.: RELAP5/MOD2 code manual, NUREG/CR-4312, EGG-2396 (1987).
- 2) Matsuoka, H. and Ishiguro, M.: Package Flow Models and Its Fuzzy Implementation for Simulating Nuclear Reactor System Dynamics, J. of Nuclear Science and Technology, Vol.33, No.1, p.25-33 (1996).
- 3) Matsuoka, H. and Ishiguro, M.: Package Flow Models by Neural Network Representation for Understanding the Dynamic Behavior of Nuclear Reactor Systems, J. of Nuclear Science and Technology, Vol.33, No.9, p.275-285 (1996).
- 4) Ishiguro, M. and Matsuoka, H.: A Learning Algorithm with an Error Range Applied to a Neural Network Incorporated in the Package Flow Model, Proc. of SCF97/ISAS' 97, Vol.3, Caracas, Venezuela, July 7-11, 1997.
- 5) H. Matsuoka: A Simple Fuzzy Simulation Model for Nuclear Reactor System Dynamics, Nuclear Technology, Vol.94, 228-241 (1991).
- 6) 丸繁, 石黒, 坪井: 熱の流れ解析におけるパッケージフローモデルのオブジェクト指向プログラミング, 第26回情報処理学会, 1S-02 (1998)
- 7) 石黒, 丸繁, 松岡: ニューラルネットワーク手法導入のためのパッケージフローモデルとその応用, 情報処理学会研究報告, 97-MSP-18, p.31-36 (1998)