物理モデルを用いた蓄熱槽の異常検知に関する研究

FAULT DETECTION IN THERMAL STORAGE TANK
USING PHYSICAL MODEL

相良 和伸*

Kazunobu SAGARA

A method of fault detection in thermal storage tank and results of applying to data which are generated by simulation and are obtained from an actual thermal storage system are presented. In the fault detection, a physical model is used for a water thermal storage tank of multi-connected complete mixing type, and unknown parameters of the physical model are identified from measured data. Faults can be detected by comparing value of identified parameters with value of the identified parameters under normal condition. In this report, simulation study was conducted in which several faults in storage tank, such as insulation damage of tank wall or abnormal water level in tank, were tried to detect. Furthermore, an analysis of identified parameters of the model is presented for measured data in an actual system.

Keywords: *Fault detection, Thermal storage tank, Physical model, Multi-connected complete mixing tank, Simulation, Actual system*

異常検知、蓄熱槽、物理モデル、連結完全混合槽型、シミュレーション、実システム

1. はじめに

建築設備は技術の進歩とともにますます複雑なものとなり、システムに異常が発生したときに設備管理者の対応が困難となつてきているとともに、熟練技術者の確保も困難となりつつある。システムに異常が発生したままでも運転を継続すると機器の損傷に至るというだけでなく、快適環境の実現と省エネルギーを追及した設計であったとしても、そのせつかくの性能が活かされないこととなる。このような事態に備えて、未熟な設備管理者であってもシステムの異常が発生した場合に即座に対応できるように、設備管理システムの中に異常検知・診断支援システムを組み込む試みがなされてきている^{1),2),3)}。

住宅・建築省エネルギー機構BEMS委員会により、1992年8月に空調設備設計技術者25人を対象として、蓄熱システムに関する種々の異常の中から重大であると考えられる異常を選択する形式のアンケート調査⁴⁾が実施

されている。その結果によれば、重大と判定された異常の上位3位に槽防水異常、槽断熱異常、槽容量過小が挙げられている。他にポンプ・配管系、制御系の異常が挙げられているが、防水・断熱の異常は、その影響が急激に現れないために通常的手段では検知することが困難であることが重大な異常として選択された大きい理由となっている。

システムの異常を検知する方法として最も単純な方法は、温度や流量などの計測値がある範囲を外れたときにアラームを発するものであるが、一般には運転条件に応じてこれらの状態は変化するためにその範囲を定めるのは困難である。運転条件の変化を考慮した方法としては、入力に対する出力の正常時における関係をモデル化し、そのモデルの出力と異なる計測値が得られたときに異常と判定する方法がある。さらに、計測データからモデルのパラメータを同定することにより、正常時のパラメー

* 三重大学工学部建築学科 教授・工博

Prof., Department of Architecture, Faculty of Engineering, Mie University, Dr. Eng.

タ値と異なるパラメータ値が得られたときに機器の特性が何らかの異常により変化したとして異常を検知する方法があり、この場合には単に異常の検知だけでなく、異常原因に関する情報を得ることも可能となる⁴⁾。モデルとしては、物理モデルを利用する場合とARMAモデルのような時系列モデルを利用する場合があるが、可能であれば物理モデルを利用した方が同定されるパラメータが物理的な意味を持っていることから異常原因の診断が容易であると考えられる。

本研究では、連結完全混合槽型蓄熱槽を用いた蓄熱システムに関して、蓄熱槽自身の断熱材や水位の異常を自動的に検知することを目的として、蓄熱槽の物理モデルのパラメータを計測データから同定することにより、その動特性の変化を検知して異常診断を行う方法をシミュレーションにより検討した結果を示すとともに、実蓄熱システムの計測データを用いてパラメータ同定を行った結果を示した。

2. 蓄熱槽の物理モデル

連結完全混合槽型蓄熱槽は、槽内が完全混合状態である槽が直列に連結されていることにより、蓄熱槽全体として高温水と低温水の分離を図ろうとするものであるが、ここでのモデルでは死水域および槽壁との熱のやり取りを考慮し、以下の仮定によりモデル化した。

- 各槽内において、流入水は蓄熱に有効な部分で完全混合し、死水域は蓄熱に全く関与しないものとする。
- 各槽での有効部分の水温の水が次槽へ流入するものとする。
- 水の密度と比熱は水温に依存しないものとする。
- 槽内の水と槽壁との熱のやり取りは、壁体とのサイクリックな吸放熱に関係する部分と定常的に熱が一方方向に流れる部分とに分離できるものとする。

また、槽内の蓄熱に有効な部分の比率を有効容積率 P としているが、ここでは水位が低下した場合にも有効な部分の容積が減少したものとみなすこととする。

以上の仮定から、 N 槽から構成される蓄熱槽の第 i 槽における水温は次式に支配されるとした。

$$\rho c_p P_i V_i \frac{d\theta_i}{dt} = \rho c_p Q(\theta_{i-1} - \theta_i) + U_i A_i (\theta_{amb,i} - \theta_i) + q_i A_i \quad (1)$$

ここで、

$$\theta_0 = \theta_{in}, \quad V_t = \sum_{i=1}^N V_i \quad (i = 1, \dots, N) \quad (2)$$

である。ただし、配管系の設計によっては、低温側端槽と高温側端槽で冷凍機や空調機からの入力と隣槽からの入力が同時に発生する場合があります、その場合には(1)式右

辺第1項が入力の数だけ必要となる。右辺第2項は、壁体とのサイクリックな吸放熱に関係する部分であり、一日程度では一定と考えられる蓄熱槽の周辺土壤温度と一日周期でサイクリックに変動する槽内温度との温度差による吸放熱を表しており、ここでは、周辺土壤温度 $\theta_{amb,i}$ は槽内水温 θ_i の一日の平均温度に等しいとした。右辺第3項は、定常的に熱が一方方向に流れる部分であり、機械室などに接した蓄熱槽の天井部分からの定常的な熱流および実際の周辺土壤温度と $\theta_{amb,i}$ (=槽内日平均水温)との差による熱流を代表しているとした。

異常検知においては、このモデル式の3個のパラメータ($P_i \cdot U_i A_i \cdot q_i A_i$)を同定することとする。

3. 物理モデルのパラメータ同定と異常検知

個々の槽全てについて3個のパラメータを同定するためには、全ての槽で水温が測定されている必要があるが、現実には蓄熱制御などに必要な数箇所の槽のみで測定されているのが一般的であるため、ここでは、一部の槽内温度の測定値からパラメータ同定を可能とするために、パラメータ値が全分割槽で同じ値である($P_i = P, U_i A_i = UA, q_i A_i = qA$)とし、蓄熱槽全体で3個のパラメータ(P, UA, qA)を同定することとする。パラメータの同定においては、測定された入力条件下でモデルを用いたシミュレーションを行い、測定槽の水温との誤差の24時間の積算値が最小となるように、最小値探索アルゴリズムの一つである修正Powell法⁵⁾を用いてパラメータの値を求める。具体的な手順は以下の通りである。

1. 全ての槽の初期温度(午前0時)を測定されている槽内温度から内挿する。
2. モデルのパラメータの初期値をセットする。ここでは、 $P = 1.0, UA = qA = 0.0$ としている。
3. 一日分の測定された入力温度と流量の条件下におけるシミュレーションを行う。
4. 測定されている槽での測定水温と計算水温との一日分の自乗誤差を積算する。
5. 修正Powell法を用いて、誤差が最小になる方向に新しい P, UA, qA の値を決める。

上記の手順に沿って、最小誤差が得られるまで3~5を繰り返すことにより、1日分のデータから P, UA, qA が1個ずつ同定できることになる。そして、毎日の同定パラメータ値を蓄積していくことにより、異常が発生した日(異常日)には同定パラメータ値がこれまでの正常日のパラメータ値と異なる値となることから異常検知できることになる。

図1 想定蓄熱システムの概要

表1 想定蓄熱システムの条件

蓄熱槽容量	400 m ³
分割槽数	26
外周槽壁断熱材厚さ	50 mm
冷凍機容量	125 Mcal/h
冷凍機側流量	25 m ³ /h
標準冷凍機出口温度	6℃
冷凍機出入口温度差	5℃（一定）
空調機出入口温度差	7℃（一定）
測定槽内温度	8点
測定時間間隔	1時間

4. シミュレーションによる異常検知の検討

連結完全混合槽型蓄熱槽と冷凍機、空調機から構成される図1および表1に示した蓄熱システムを想定し、シミュレーションにより正常時と異常時のデータを生成して断熱材異常などの診断を試みた。

蓄熱槽の断熱は、槽天井・底部・外周のみとし、隔壁には設けないこととした。また、ここでは冷凍機出口温度が6℃一定となるように入力三方弁を制御しているとし、入口温度が変化しても冷凍機的能力変化を無視して出入口温度差を5℃一定とした。空調機についても流量増減によるコイル特性を無視して常に一定出入口温度差7℃とした。

(1) データ生成のための蓄熱槽物理モデル

各槽の6面の槽壁における熱流を考慮して、有効容積部分で完全混合する*N*個の槽からなる蓄熱槽の第*i*槽の槽内水温が次式で表されるとする。

$$\rho c_p P_i V_i \frac{d\theta_i}{dt} = \rho c_p Q (\theta_{i-1} - \theta_i) + \sum_{j=1}^6 q_{ij} A_{ij} \quad (3)$$

パラメータ同定用の物理モデルとの違いは、槽壁との熱のやり取りの部分であり、データ生成用のモデルでは槽壁内部で一次元熱伝導を仮定し、より現実に近い熱流計算を行った。

シミュレーションでは、各槽の各槽壁（側壁・天井・底部）毎に、上式を差分化して槽壁内部温度および壁面熱流を求めた。槽壁熱流計算の際の境界条件は以下の通りとした。

表2 槽壁熱流計算に用いた各種熱定数

	熱伝導率 kcal/(m·h·℃)	温度拡散率 ×10 ⁻³ m ² /h	熱伝導抵抗 m ² ·h·℃/kcal
コンクリート	1.3	3.0	
土壌	0.50	1.4	
断熱材	0.032	(フォームポリスチレン)	
空気層		(下向き熱流)	0.30
		(上向き熱流)	0.20

- 槽壁内部表面温度は槽内水温に等しい。
- 槽外周壁の外側表面から1mの地中土壌温度は一定である。
- 槽上部の床下の室温は一定である。
- 断熱材と槽上部空気熱容量は無視できる。
- 槽外周部槽壁と土壌の間の熱抵抗は無視できる。

計算に用いた各種熱定数を表2に示す。以上の仮定と式を用いて数値計算を行い、蓄熱槽への低温側・高温側入力温度、それぞれの流量、そして全26槽のうち8槽の水温の1時間毎のデータを異常検知のためのデータとした。シミュレーションによる検討では、このデータを測定データと呼んでいる。測定データ生成のシミュレーションは、槽内温度11℃一様から始めて、冷凍機の運転を16時から翌日13時の21時間運転とし、冷房負荷は8時から18時の10時間を想定して8日間のシミュレーションを行い、8日目の24時間分のデータを測定データとした。異常条件のシミュレーションは、8日目の0時に異常が発生したと想定して、8日目のみ異常条件下でシミュレーションを行い、24時間分の異常条件の測定データとした。

なお、シミュレーションで想定した槽壁のコンクリートの厚さについては、槽外周では1.0m、隔壁では0.1、0.6、1.0mの3種類、天井スラブでは0.16mとし、また、計算分割幅は土壌の場合と共に0.02m、計算時間間隔は3分間としている。図2に正常時における入力温度・冷凍機出力・冷房負荷の推移を、図3に槽内温度分布の推移を示した。図4には、第10槽における各槽壁内部の温度分布の推移を示した。

(2) シミュレーションによる異常検知の検討

データ生成シミュレーションでは全ての槽で $P_i = 0.95$ と設定し、槽の異常としては、断熱材異常、水位異常、温度センサ異常などを以下のように想定した。

- 第10槽で全断熱材破断
- 全ての槽の天井部分の断熱材破断
- 全ての槽で全断熱材破断
- 水位の異常低下 ($P = 0.8$)
- 温度センサ異常のため第11槽で異常水温（正常時の水温+3℃）

図4 正常時の第10槽槽壁内部の温度分布の推移

図2 正常時の入力温度・冷凍機出力・冷房負荷の推移

図3 正常時の槽内温度分布の推移

ここで、断熱材破断とは断熱材がなくなっていることを意味している。表3に、正常時を含め、種々の異常についてパラメータ同定を行った結果を示したが、以下に要点を示す。

- 第10槽だけの断熱材破断のみでは正常時とほとんど差がない。

表3 同定結果一覧

異常条件	P	UA^{*1}	qA^{*2}	θ_{ave}^{*3}
正常	0.953	505	66	10.5
第10槽断熱材全破断	0.953	512	75	10.5
全槽天井断熱材破断	0.952	530	282	10.7
全槽全断熱材破断	0.965	683	266	10.8
水位低下($P=0.80$)	0.802	437	62	10.5
第11槽温度センサ異常 ^{*4}	0.912	818	171	10.6
槽壁熱損失無視	0.933	317	33	10.4

*1:[kcal/(h·°C)] *2:[kcal/h] *3:[°C] *4:測定値+3 [°C]

- 全槽天井断熱材破断の場合には定常熱取得 qA が顕著に増大する。
- 全槽全断熱材破断の場合でも周期的吸放熱に関係する UA はそれほど増大しない。
- 水位低下は有効容積率 P の変化として容易に検知できる。
- センサ異常は断熱材破断と良く似た同定結果となる。
- 日平均蓄熱温度(槽内平均温度) θ_{ave} は、断熱異常の段階に応じて、0.0~0.3℃程度上昇している。

図5に、第10槽での正常時と全断熱材破断時の熱取得の時間推移の比較の例を示した。同定パラメータによる

図5 第10槽での正常時と全断熱材破断時の熱取得の時間推移の比較

図6 入力温度・冷凍機出力・冷房負荷の推移(8/12)

図7 各種流量の推移(8/12)

表4 実システムの概要

所在地	東京都
構造	鉄骨鉄筋コンクリート造
延床面積	9784m ² (建築面積 2404m ²)
階数	地上4階・地下1階
主要用途	事務所
熱源設備	熱回収型空気熱源ヒートポンプ 空気熱源ヒートポンプ 冷房専用空冷チラー
空調設備	単一ダクトVAV方式(一般系統) 単一ダクト+FCU方式(特殊系統)
蓄熱槽	連結多槽型・26分割槽・400m ³ 断熱仕様:天井・底部・隔壁の6面とも現場発泡ウレタン25mm

熱取得の振幅が生成測定データより大きく、位相が少し遅れているが、これはパラメータ同定用蓄熱槽モデルにおける槽壁との熱のやり取りがかなり簡易化され、槽壁の熱容量を無視した定常熱伝導を仮定してモデル化されているためである。この影響が何らかの形で同定誤差として現れていると思われるが、ここでの同定結果を見る限りでは、断熱材破断の場合には熱取得の振幅がかなり

図8 同定・実測槽内温度の推移(8/12)

図9 同定・実測槽内温度分布の推移(8/12)

大きくなっており、異常検知に際して大きい影響はないようである。

5. 実システムの実測データによる同定

分割槽数26の蓄熱槽を持つ熱源3系統・二次側3系統の実システムの測定結果を用いてパラメータの同定を行った。表4に実システムの概要を示した。直接実測されていない入力温度については、各系統の流量により重みを付けて平均温度を算出して用い、熱源の高温側・低温側流量については、熱源入口温度と流量、および蓄熱槽の高温側・低温側汲上槽水温とそれぞれの流量の関係から推定した。

(1) パラメータ同定結果の分析

同定例として、8月12日についての詳細を図6～9に示した。それぞれ、実測データから推定した入力温度と冷

図10 実測データによる同定パラメータ値の度数分布 (1989年7～9月)

図11 トンプソンの棄却検定における有意水準の度数分布 (1989年7～9月)

図12 日曜・祝日と平日の同定パラメータ値の度数分布 (1989年7～9月)

凍機出力・冷房負荷、流量、および槽内水温の時間変化と分布に関する同定パラメータによる計算結果と実測結果の比較である。

1989年7月～9月の3カ月92日分の実測データによる同定結果を度数分布として図10に示した。想定システムでの同定結果(表3)に比べて、壁体との吸放熱に関係する UA が全体的に小さくなっているのは、想定システムでは隔壁は断熱なしとしているのに対して実システムでは隔壁も断熱されているためと考えられる。また、槽壁からの定常的な熱取得に関係する qA が全体的に若干負側に偏っているのは、実システムの蓄熱槽上部の室温が想定システムの場合(27℃)より低温である可能性も考えられるが、熱取得が負になるとは考えにくく、同定値のばらつきがかなり大きいことも考え合わせると同定誤差と考えた方がよいと思われる。同定値にばらつきがある場合に有効であると考えられる統計的検定によって異常値を検知するためにトンプソンの棄却検定^{6),7)}を行い、その有意水準の度数分布を図11に示した。

日曜や祝日は負荷が小さく平日とは運転状況が異なると思われるので、日曜・祝日と平日に分けた同定パラメータ値の度数分布を図12に示した。日曜・祝日と平日の差

表5 日曜・祝日と平日の差異の t 検定結果

	平均値		t 値	有意レベル
	日曜・祝日	平日		
P	0.932	1.010	8.09	1%
qA^{*1}	269	-96	6.34	1%

*1:[kcal/h]

異を統計的に検証するために t 検定^{6),7)}を行った結果を表5に示したが、 P と qA については1%有意で差があるという結果となった。ただし、図12で用いた同定パラメータ値は、その分布を同定値全体の平均値と標準偏差を持つ正規分布と仮定して両側1%を除外したものである。これらの結果から、負荷などの諸条件と同定パラメータ値との間に何らかの相関があると考えられ、高い相関係数が得られた結果の一部を図13に示した。図中 r は相関係数である。この結果から、 P については、負荷が少なく流量が小さいときに、そして蓄熱温度差が大きいときに値が小さくなることから、浮力の効果で有効容積が減少することが考えられる。 qA については、槽内平均温度が下がればそれだけ周囲からの熱取得が増大する傾向が現れていると考えられる。

図13 同定パラメータ値と日負荷・日平均蓄熱温度差・日平均蓄熱温度との関係 (1989年7～9月)

図14 相関を考慮したトンプソンの棄却検定における有意水準の度数分布 (1989年7～9月)

これらの相関を異常値の判定に組み入れるために以下の回帰式を求めた。

$$P^* = 1.035 - 364.3(\Delta\theta_{ave}/Q_{ave}^2) \quad (4)$$

$$qA^* = 1178 - 120.4\theta_{ave} \quad (5)$$

ただし、回帰式を求めるために用いた同定パラメータ値は、図12の場合と同様に両側1%を除外したものである。また、 P に関する回帰式では浮力の影響を物理的に代表する説明変数の形としている。この回帰式による推定パラメータ値と同定値との差に関して、トンプソンの棄却検定における有意水準を求め、その度数分布を図14に示した。この処理により検知レベルが向上し、1%有意で異常値と判定される4日分のパラメータ値を表6に示した。 P と qA において有意水準が1%レベル以上となる異常日では、原因が「不明」の1日を除いて、槽内温度や入力温度の測定データの異常が原因であることが分かった。

ここで同定に用いられたデータは、順調に稼働しているシステムにおける測定データであるため、測定データの異常のみの検知しかなされていないが、実システムの測定データにより同定されたパラメータ値がある程度分布していても、統計的なデータ処理と検定を利用することにより異常検知が可能であることが明らかとなった。

(2) 断熱材の異常検知の検討

シミュレーションによる異常検知で検討した断熱材の破断に関しては、実システムのデータでは断熱材破断時のデータは得られていないため、断熱材異常時に起こり

Date	P	UA^{*1}	qA^{*2}	異常の原因
7/14	1.205	305	-1082	測定データの異常
7/31	0.800	498	1273	不明
9/14	1.185	191	-1352	測定データの異常
9/15	1.233	397	-1137	測定データの異常

*1:[kcal/(h·°C)] *2:[kcal/h]

得る槽内温度上昇を模擬したデータを実測データから作成した。ここでは8月の実測槽内温度から、断熱材破断のために0.1°Cだけ温度が上昇するとして、

$$\text{異常時槽内温度} = \text{測定槽内温度} + 0.1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6)$$

のように断熱材異常時のデータを作成した。これは、想定システムの結果(表3)を参考にして、おおよそ、全槽の天井断熱材破断の場合に相当するような槽内温度上昇としたものである。

熱損失に関係する qA について、7月の正常時の同定結果につづいて8月の異常時と正常時の同定結果を図15に示した。これから、同定された qA の値の正常時と断熱材異常時の差異は比較的小さく、毎日の同定値を比較しただけでは異常検知が困難なことが明らかであり、ここでは、統計的な検定手法である t 検定を応用した異常検知を検討した。

7月と8月の同定された qA をある境界日を境にしてその境界日より以前の日のグループと境界日を含む以後の日のグループの2グループに分割し、両者のグループの平均値に差がないという仮説を棄却できる、すなわち、両者のグループの平均値に差があるといえる場合の有意レベルを算出した。図16に、設定された分割境界日を1日づつずらしたときの有意レベルの変化を示したが、断熱材異常が発生した8月1日を境にして正常日と異常日が完全に二分されるため、8月1日を境界日にしたときに最も有意レベルが高くなっており、断熱材の異常が検知できたことになる。

現実の断熱材異常時のデータによる検討ができていな

図 15 正常時と断熱異常時の qA の変化 図 16 t 検定の有意レベルの変化

いが、同定パラメータにある程度の差異が現れれば、統計的検定により断熱材の異常についても検知できる可能性を示せたと考えている。

6. おわりに

連結完全混合槽型蓄熱槽を用いた蓄熱システムに関して、蓄熱槽自身の断熱材や水位の異常を自動的に検知することを目的として、蓄熱槽の物理モデルのパラメータを計測データから同定することにより、その動特性の変化を観察して異常検知を行う方法をシミュレーションおよび実システムの計測データにより検討した結果を示した。

本研究をまとめると以下の通りである。

1. 槽壁との熱のやり取りを、壁体とのサイクリックな吸放熱に関係する部分と定常的に熱が一方方向に流れる部分に分離した異常検知のための蓄熱槽物理モデルを示し、測定データから蓄熱槽モデルのパラメータを同定することにより異常検知を行う方法と手順を示した。
2. 槽壁の伝熱を一次元熱伝導と仮定してモデル化したシミュレーションを利用して異常データを発生させることにより、槽の水位異常や断熱材異常などの検知の可能性を検討した。
3. 実蓄熱システムの実測データを用いてパラメータ同定を行った結果を示し、同定パラメータと種々の運転状況との相関関係を考慮して、異常検知をトンプソ

ンの棄却検定を利用して行い、計測データの異常が検知できることを示した。

4. 断熱材の異常検知の検討のために実測データを利用して断熱材異常時のデータを作成し、同定パラメータの変化を t 検定を応用した方法で検知することにより異常検知が可能であることを示した。

蓄熱槽の断熱材異常は重大な事態ではあるが、そう頻繁に発生することはないと思われ、また、シミュレーションによる検討結果に示したように、一つの槽のみの断熱材異常の検知は困難であるなどの問題点は残されているが、水位の低下や温度センサー異常などの検知については比較的容易であることが明らかとなった。また、槽内水温の測定点が少なくても、パラメータ同定されたモデルの利用により時々刻々の槽内温度分布を推定することが可能であり、槽内温度分布の推移に影響が現れる制御系の異常などの検知⁸⁾に利用することも可能となると考えている。

謝辞

本研究は、国際エネルギー機関 (IEA) Annex 25 の国際共同研究「空調設備の最適化と異常検知・診断の研究」の一環として行ったものであり、中原信生委員長 (名古屋大学) ほか関係各位および実蓄熱システムの計測データを提供いただいた (株) 東京電力に謝意を表します。

記号

A	: 槽壁表面積 [m^2]
c_p	: 水の定圧比熱 [$\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]
i	: 分割槽番号
j	: 槽壁番号
N	: 槽数
P	: 有効容積率
q	: 槽壁表面熱流 [$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]
Q	: 入力流量 [m^3/h]
Q_{ave}	: 日平均入力流量 [m^3/h]
t	: 時間 [h]
U	: 槽壁熱貫流率 [$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]
V	: 槽容量 [m^3]
V_t	: 全蓄熱槽容量 [m^3]
ρ	: 水の密度 [kg/m^3]
θ	: 水温 [$^\circ\text{C}$]
θ_{in}	: 第1槽入力水温 [$^\circ\text{C}$]
θ_{amb}	: 周辺土壌温度 (=各槽日平均水温) [$^\circ\text{C}$]
θ_{ave}	: 日平均蓄熱温度 [$^\circ\text{C}$]
$\Delta\theta_{ave}$	: 日平均蓄熱温度差 [$^\circ\text{C}$]
*	: 予測値

本論文に関連する既発表論文

1. 相良和伸: 連結多槽型蓄熱槽の異常検知・診断法のシミュレーションによる検討、日本建築学会東海支部研究報告、第31号、pp.441~444、1993.2
2. 相良和伸: 連結多槽型蓄熱槽の異常検知・診断法のシミュレーションによる検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1659~1660、1993.9
3. 相良和伸: 連結多槽型蓄熱槽の異常検知・診断法の検討、空調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.393~396、

1993.10

4. 相良和伸：動的物理モデルを用いた連結多槽型蓄熱槽の異常検知・診断法の検討、日本建築学会東海支部研究報告、第32号、pp.397～400、1994.2
5. 相良和伸：連結多槽型蓄熱槽の異常検知・診断法の実測データによる検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.907～908、1994.9

参考文献

1. 中原信生：B O F D（ビル最適化とフォルト検知）の概念設計、日本建築学会東海支部研究報告集、第30号、pp.281～284、1992.2
2. 高橋惇・伊東民雄・柴田克彦・清水昭浩：空調設備異常予知診断エキスパートシステム、空気調和・衛生工学、Vol.66、

No.12、pp.47～56、1992.12

3. 焼山誠・宮崎友昭・竹井宏：B E M Sにおけるシステム監視と動作検証手法の研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1747～1750、1993.9
4. 国際エネルギー機関（IEA）Annex 25：Building Optimisation and Fault Diagnosis System Concept, 1993.10
5. 嘉納秀明：システムの最適理論と最適化、コロナ社、1987.1
6. 石村貞夫：統計解析のはなし、東京図書、1989.4
7. 黒瀬・松島・松尾：C言語による科学技術計算サブルーチンライブラリ、啓学出版、1986.11
8. 鄭明傑・中原信生：空調システムフォルトの動的シミュレーション その6 パターン認識による蓄熱システムフォルトの検知に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1113～1116、1994.10

(1994年10月26日原稿受理、1995年5月29日採用決定)