

温度別蓄熱槽に関する一試案

(第3報, 立ち上がりの早い昇温化について)

A Proposal on Temperature Unblended-Type Thermal Storage Tank
(3rd Report : Examination of Rapid Temperature Rise in Partial Region)竹内 正紀*
Masanori TAKEUCHI木村 照夫**
Teruo KIMURA安川 敬一***
Keiichi YASUKAWA浦辻 孝和****
Norikazu URATSUJI

Abstract

In our preceding reports, a simple thermal storage tank in which the tank was composed of vertical double cylinder without the partition on the bottom side of the inner cylinder was presented and the availability of the storage tank was proved by the experiments of the storage and the extracting processes. In this report, we propose a system of rapid temperature rise in the partial region in the above storage tank by using the handmade valve constructed with shape memory alloy. And the experimental results were simulated by the numerical model using finite difference method.

Key Words : Thermal storage tank, Unblended-type, Rapid temperature rise, Simulation method, Shape memory alloy

1. 緒 言

著者らは極めて簡単な構造で熱源の温度に応じて温度別に有効に蓄熱し得る二重円筒形蓄熱槽を考案試作し、前報ではこの特性を実験的に明確にするとともに^(1,2)、より詳細な特性の把握と最適設計に資するための数値シミュレーション法を開発した⁽³⁾。温度別蓄熱槽の特徴は槽内の高温水と低温水とを分離して蓄熱し、かつ、流入する熱源の水に温度変動が生じて、その温度に対応した温度領域に蓄熱し得ることである。しかし、試作した蓄熱槽は高温領域と中温領域は連通穴で結ばれており、蓄熱開始後の短時間に、高温領域の温度を上昇させること、すなわち立ち上がりの早い昇温化を実現させることは考慮されていない。しかるに、部分負荷で使用される場合も考えると蓄熱槽内の温水取り出し時に常に蓄熱槽の全温水が回収の対象になるとは限らないので、蓄熱槽内の限られた領域を先ず使用温度まで上昇させることも必要であると考えられる。そこで本報では温度別蓄熱槽の性能改善の一つとして、上記連通穴に所定の温度で開閉する弁を取り付け、立ち上がりの早い昇温化の実現を図った実験を行うとともに、前報⁽³⁾での数値シミュレーション

法を本報の系に拡張して、蓄熱現象をシミュレートした。なお、連通穴の開閉弁にはセンサー兼アクチュエータとなる形状記憶合金を組み込んだ弁を自作し用いた。

主な記号

H : 蓄熱槽の高さ

Q : 集熱回路の循環流量

Q_0 : 弁を通る流量

Q_1 : 温水取り出し流量

T : 温度

T_0 : 初期温度

ΔT : 集熱回路に設けたヒーターの出口と入口における水の温度差

t : 加熱開始直後からの経過時間

t_1 : 温水取り出し直後からの経過時間

* 福井大学工学部 教授
Faculty of Engineering, Fukui University
Professor

** 福井大学工学部 助手
Faculty of Engineering, Fukui University
Research Associate

*** 株式会社 エナール技研 取締役社長
Enerl Giken Co., Ltd. President

**** アイシン精機 株式会社
Aishin Seiki Co., Ltd.

- t^* : 蓄熱実験における換水時間 = V/Q
- t_1^* : 温水取り出し実験における換水時間 = V/Q_1
- V : 蓄熱槽の体積
- Y : 蓄熱槽の底からの距離
- y : 無次元距離 = Y/H
- θ : 無次元温度 = $(T - T_0)/\Delta T$
- δ : 弁閉の状態からの弁体の移動量
- τ : 無次元時間 = t/t^*
- τ_1 : 無次元時間 = t_1/t_1^*

2. 実験装置と方法

本報で取り扱う温度別蓄熱槽は図1に示すように前報^(1,2)で報告した形式Bと同様の形状であり、外槽の天井に、底の無い内槽を取り付けたアクリル製の二重円筒構造である。本報では高温領域である内槽領域の立ち上がりの早い昇温化の実現のため、連通穴部に形状記憶合金を組み込んだ自作の弁を図2のように取り付けた。この弁は図2のようにTi-Ni合金の一方向性形状記憶合金バネ(SMAバネ)とバイアスバネを組み合わせたもので、図3のような特性を示す。すなわち、図2のようにSMAバネは内槽の天井付近に位置しているので、図3に示す弁体の移動量と温度との関係から判断すると、弁はその付近の水の温度が40°C付近になるとほぼ完全に開き、37°C付近以下になるとほぼ完全に閉じる。なお、弁の開閉温度はSMAバネとバイアスバネとの組合せにより任意に設定することができる。また、形状記憶合金を利用した弁はセンサー兼アクチュエータとなるため弁の開閉に外部からの作動入力が必要としない利点がある。図1、図2に示す+印は測温点を示しており、後述する蓄熱過程および温水取り出し過程の実験において各測温点の温度を、集熱回路内、取り出し回路内の温水の温度とともに直径0.2mmのクロメル・アルメル熱電対によって測定した。実験装置の系統は前報^(1,2)と同様である。蓄熱過程の実験は次のように行った。あらかじめ槽内に冷水として水道水を満たし、循環ポンプにより適当な流量を集熱回路(図1に示す蓄熱槽の流出口から出た水が再び流入口へ戻るまでの回路)に循環させ、槽内の水が様な温度になったところで集熱回路の途中に設けたヒーターの電源を投入し、水に一定量の熱量を加えることによって実験を開始し、それ以降の適当な時間間隔ごとの各部の温度を測定記録した。また、温水取り出し過程の実験は次のように行った。一定時間蓄熱した後にヒーターとポンプを停止し、蓄熱槽の底面付近に押し出し用の冷水を圧送することにより、

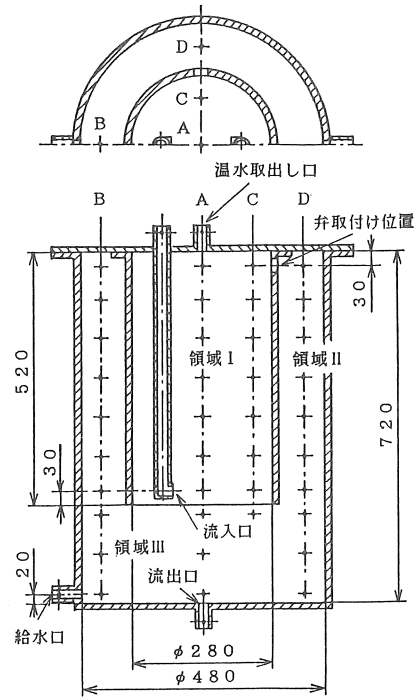


図1 蓄熱槽の概要

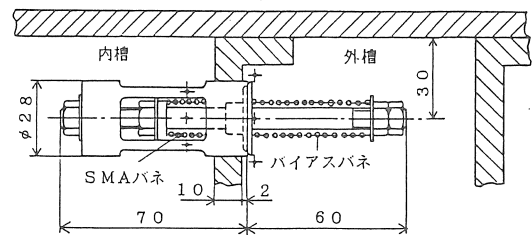


図2 弁の構造と取り付け位置

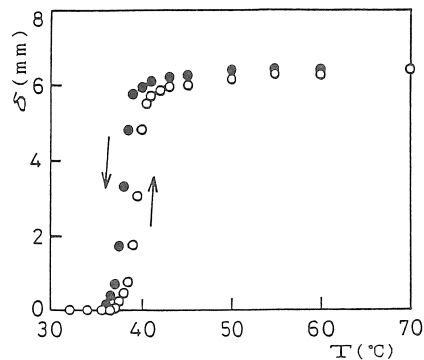


図3 弁に組込まれた弁体の移動量と温度との関係

蓄熱槽天井中央部より温水を取り出し、槽内各部の温度および取り出し温水の温度を適当な時間間隔ごとに測定記録した。なお、結果の比較のため連通穴に閉閉弁が無い場合として、常に弁を開いた状態に固定した実験も併せて行った。また、後述するように内槽と外槽では温度応答が異なるので、今後便宜的に図1に示すように内槽内側の領域を領域I、内槽外壁と外槽内側壁とで作られる環状の領域を領域II、内槽下端より下方の外槽内側の領域を領域IIIと呼ぶことにする。

3. 実験結果と考察

3.1 蓄熱過程

温度成層型の蓄熱槽では、槽内の温度経過は無次元経過時間 $\tau(=t/t^*)$ と無次元温度 $\theta[(=T-T_0)/\Delta T]$ で相似的に表される事が知られているが⁽⁴⁾、本報でも前報と同様に同じ無次元量を用いて結果を整理することにする。図4は蓄熱開始後の蓄熱槽内の温度分布を示している。縦軸 y は槽の底から上方へ測った無次元距離である。また、図中に示した弁開時刻は先述の弁の動作温度と弁周辺の温度測定結果から推定した弁の開いた無次元時刻である。図から明らかなように弁の開閉に関わらず、集熱回路の循環流の流入口および弁の位置は蓄熱槽の局所的な場所にしかないが、内槽（領域Ⅰ）の下方部分を除いて、同じ時間、同じ高さの場所の温水の温度はそれぞれの領域の水平断面上の異なる測温点の間でほぼ一致している（図4で記号が重なる場合は一つの記号のみ印してある）。内槽の下方の温度が測定位置AとCとで異なるのは、A軸の測定値に流入温水の吹き出し噴流が局所的な影響を与えているためであると考えられる。高温水は領域Ⅰ内に吹き出すため、弁が閉じている時刻 ($\tau < 0.45$) においては、領域Ⅰと領域Ⅱの温度差は大きく領域Ⅰの温度がより高くなる事がわかる。さらに、領域Ⅰでは先述のように集熱回路の循環流の流入口が領域内の下方にあるため、また、領域Ⅱには、領域Ⅰの混合高温水が内槽下端をまわって流入するため、各領域内ではそれぞれ混合し、温度は高さ方向にほぼ一様となる。ただし領域Ⅱでは内槽の壁が領域Ⅰの高温水に暖められて温度上昇し壁面に沿って弱い対流が生じるため、高さ方向にわずかな温度こう配が生じる。弁が開くと ($\tau > 0.45$) まず、領域Ⅱの上方の温度が領域Ⅰの上方の温度にほぼ等しくなり、ついで時間進行とともに領域Ⅱの温度は上方から領域Ⅰの温度に近づく。これは弁が開くと弁を通して領域ⅠよりⅡへ、また内槽の下端を回って領域ⅡよりⅠへの流れが存在することを示している。

図5 (a) は蓄熱槽内の各測温点の温度応答を、同じ循環流量 Q と集熱回路に設けたヒータによる温度上昇 ΔT の実験について、弁有りの実験と弁無しの実験を重ねて示し、弁の有無が蓄熱に及ぼす影響を調べたものである。ここで、前述したように同じ時間の水平断面上の温度は変わらないので領域ⅠはC軸の測定値を、領域Ⅱ、ⅢはD軸の測定値を示した。また図5 (b) は、ある温度 θ と $\theta + \Delta\theta$ の間にある温水の体積と蓄熱槽の体積との比 ξ を $\Delta\theta = 0.1$ にとって弁が

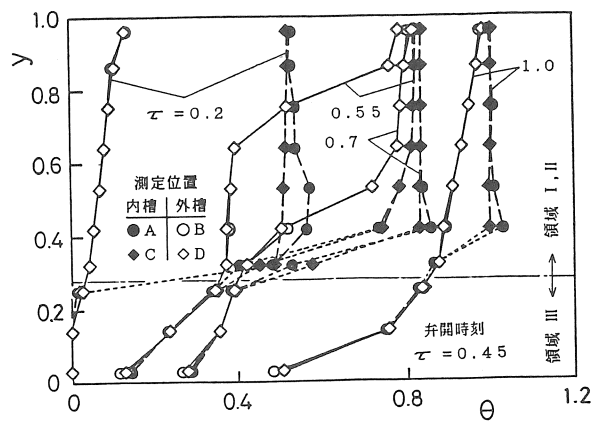
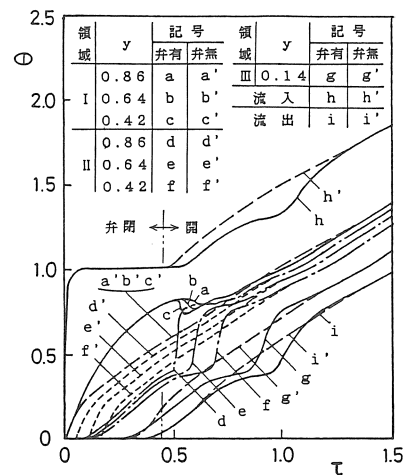
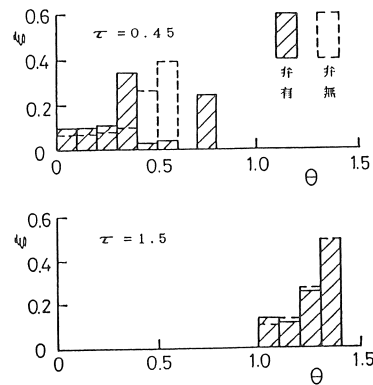


図4 蓄熱過程の蓄熱槽内の温度分布 ($\Delta T = 27.9^\circ\text{C}$, $T_0 = 16.5^\circ\text{C}$, $Q = 0.86\text{ l/min.}$)



(a) 温度応答



(b) ヒストグラム

図5 弁の有無による蓄熱過程の比較
(弁有り: $\Delta T = 27.9^\circ\text{C}$, $T_0 = 16.5^\circ\text{C}$, $Q = 0.86\text{ l/min.}$)
(弁無し: $\Delta T = 27.4^\circ\text{C}$, $T_0 = 18.1^\circ\text{C}$, $Q = 0.87\text{ l/min.}$)

開く直前 ($\tau = 0.45$) と弁が開いた後十分に時間が経過した時刻 ($\tau = 1.5$) について示したヒストグラムである。図5 (a) より明らかなように弁の存在により連通穴が閉じている間は、領域Ⅰの温度は弁がない場合より高くなり、他方領域Ⅱの温度は弁がない場合に

は温度成層するが、その平均温度より低くなる。すなわち集熱回路で集熱される熱量は同じでも弁が閉じている場合には領域 I のより早い昇温化が実現される。これは弁がない場合に生じる領域 I, II 間の自然循環流を阻止すること、すなわち領域 II の低温水が領域 I へ流入し、その温度を低下させることを防止することによって実現される。なお、図 5 (b) に示すヒストグラムにおいても見られるように、弁有りの場合は弁無しの場合より高温の流体が貯えられ、その高温部の占める割合は領域 I の占める割合 (22.5%) にほぼ一致する。一方、領域 I 内の温度が弁開温度に達し弁が開くと領域 II の温度が上方より順次急激に上昇し、領域 I の下方の温度は急激に低下する。これは弁が開くと領域 I の高温水が連通穴を通して領域 II に流入し、一方領域 II の低温水が領域 I に下方より流入するためである。弁開後時間が充分経過すると温度応答は弁の有無にかかわらず両者はほぼ一致し、図 5 (b) に示すヒストグラムも弁の有無に関わらずほぼ一致する。なお、この弁開後に両者が一致するまでの時間は実験条件によってほぼ 0.5~1 換水程度であった。

3.2 温水取り出し過程

領域 I の立ち上がりの早い昇温化を必要とする場合は温水を取り出す場合にも、高温領域である領域 I の温水のみが取り出しの対象となると考えられる。そこで、温水の取り出し実験は、弁が開く以前に蓄熱過程を終了し温水を取り出す場合と、弁が開いた後槽内温度が充分に高温に成るまで蓄熱した後 (弁無しの場合の温度分布と同等に、かつ槽内温度がすべて弁開温度以上になってから) 温水を取り出す場合について行った。先ず前者の温度応答線図を図 6 (a) に示す。なお、縦軸は蓄熱過程と同じ無次元温度 θ 、横軸は取り出し直後からの経過時間 t_1 を取り出し換水時間 t_1^* で無次元化した無次元時間 $\tau_1 = t_1/t_1^*$ である。図より

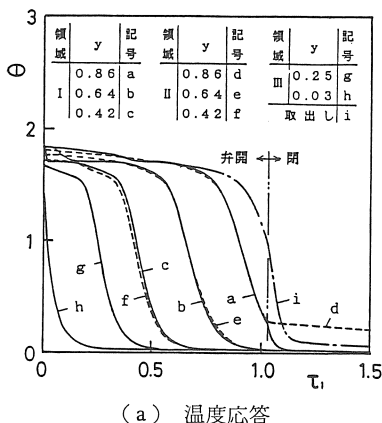
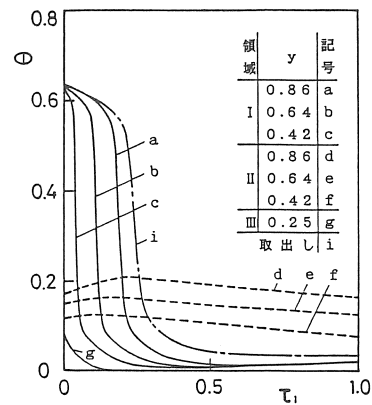
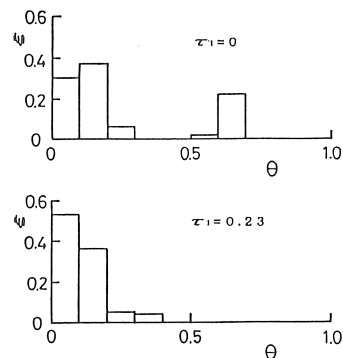


図 7 温水取り出し過程 (取り出し開始時に弁が開いている場合) ($\Delta T = 27.9^\circ\text{C}$, $T_0 = 17.0^\circ\text{C}$, $Q_1 = 0.96\text{ l/min.}$)



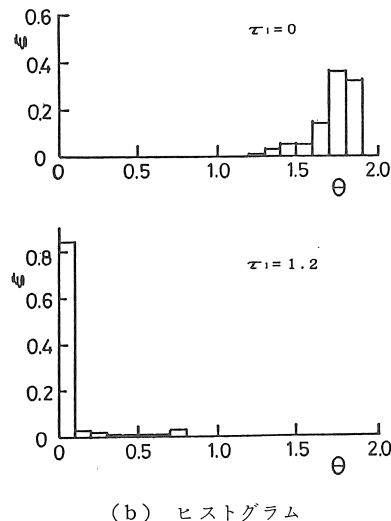
(a) 温度応答



(b) ヒストグラム

図 6 温水取り出し過程 (取り出し開始時に弁が閉じている場合) ($\Delta T = 26.6^\circ\text{C}$, $T_0 = 17.2^\circ\text{C}$, $Q_1 = 0.89\text{ l/min.}$)

知られるように取り出し温水の温度は領域 I の換水時間に相当する $\tau_1 = 0.225$ のところでステップ状に低下し、図 6 (b) のヒストグラムからも明らかのように、取り出し開始時に領域 I に蓄熱されている高温水は $\tau_1 = 0.23$ のところでほとんど取り出される。領域 II



(b) ヒストグラム

の温度は時間経過に対してほぼ一定となる。この事は弁が閉じていると領域Ⅰと領域Ⅲの温水が順次取り出され、領域Ⅱの温水は取り残されることを示している。しかし、弁開前に温水を取り出す必要がある場合は前述のように必要温水は一般に領域Ⅰのみであり、領域Ⅱの温水が取り残されるという現象は蓄熱槽の欠点にはならないと言える。

図7(a)は弁が開いた後、充分時間が経過するまで蓄熱したのち温水を取り出した場合の温度応答線図である。図より明らかなように取り出し開始時に弁が開いていると、蓄熱槽内の温水は弁閉以降に領域Ⅱの最上部に温水が若干残るものの図7(b)のヒストグラムに見られるように、取り出し終了時に最初に蓄熱した高温水は殆どすべて取り出される。したがって、弁を取り付けることによる取り出し温水への悪影響は無いと言える。

4. 数値シミュレーション

実験により、連通穴部に形状記憶合金を組み込んだ弁を取り付けることにより、所定温度(弁開温度)までの立ち上がりの早い昇温化が可能であることが明確となったが、蓄熱槽を設計するためには現象のシミュレーション法の確立が不可欠である。そこで以下にこれらの系の蓄熱状態をシミュレートする方法を考察する。

4.1 シミュレーション法

実験結果によれば弁開温度以上に蓄熱したのち温水取り出しを開始した場合は、温水取り出し時の槽内温度経過は弁のない場合と大きな違いが生じないため、シミュレーションは蓄熱過程についてのみ行った。解析方法は前報⁽³⁾と同様差分法を用い、解析の簡単のため実験結果に基づき、一次元でモデル化した。さらに前報で述べた弁がない場合の数値解析の基本的仮定を基に、本報では弁の開状態、閉状態に対して次のような仮定を設けた。

先ず、弁が閉状態の場合には

- (a) 集熱回路から流量 Q で流入する高温流体はまず領域Ⅰの流体のみと完全に混合する。
- (b) 領域Ⅰの混合温度の流体が流量 Q で領域Ⅱに流入し、領域Ⅱの流体と完全に混合する。
- (c) 領域Ⅲは温度成層する。
- (d) 領域Ⅱ、Ⅲの界面の温度は連続であるが、領域Ⅰ、Ⅲの界面の温度は不連続である。

また、弁が開状態の場合には前報⁽³⁾の弁が無い場合の仮定と同じである。

なお、蓄熱槽内で温度成層する場合の各領域の流体温度 θ_j (ここに添え字 $j=1, 2, 3$ は領域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲを表す)と体積 V_m の流体が完全混合する場合の流体温度 θ_m は次式で計算される⁽³⁾。

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial \tau} = F_0 \frac{\partial^2 \theta_j}{\partial \eta^2} - \omega u_j \frac{\partial \theta_j}{\partial \eta} - \frac{V}{\rho C Q A_j \Delta T} E_{jL} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial \tau} = \frac{V Q_a}{V_m Q} (\theta_a - \theta_m) + \frac{V Q_b}{V_m Q} (\theta_b - \theta_m) - \frac{V}{\rho C Q V_m \Delta T} E_{mL} \dots\dots\dots (2)$$

また、弁が開状態の時の弁を通る流量 Q_0 は次式で計算される⁽³⁾。

弁を領域Ⅰから領域Ⅱへ流れる時

$$\frac{Q_0}{Q} = \frac{\sigma a_0}{\omega \sqrt{\xi_0}} \left\{ \int_0^{\eta_1} \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_{1T}} \right) d\eta \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

弁を領域Ⅱから領域Ⅰへ流れる時

$$\frac{Q_0}{Q} = \frac{\sigma a_0}{\omega \sqrt{\xi_0}} \left\{ \int_0^{\eta_1} \left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_{2T}} \right) d\eta \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

ここに

$$F_0 = \frac{k}{\rho C} \cdot \frac{t^*}{H}, \quad \sigma = \frac{\sqrt{2gH}}{H/t^*}, \quad \omega = \frac{V}{A_3 H},$$

$$a_0 = A_0/A_3, \quad u_j = U_j/U_3, \quad \eta = 1 - y, \quad \eta_1 = H_1/H$$

である。また、記号表にない記号は次の通りである。

A_j : 槽の各領域の断面積, A_0 : 弁の開口面積,
 C : 流体の定圧比熱, E_{jL} : 温度成層する領域の単位長さ当り単位時間に領域外へ逃げる熱量, E_{mL} : 完全混合する領域から単位時間に領域外へ逃げる熱量, g : 重力の加速度, H_1 : 内槽の高さ, k : 流体の熱伝導率, Q_a, Q_b : 完全混合する領域へその上方, 下方から流入する流量, U_j : 槽の各領域を流体が下向きに流れる速度, ξ_0 : 弁の損失係数, θ_a, θ_b : 完全混合する領域へその上方, 下方から流入する流体の無次元温度, ρ, ρ_j : 流体の平均密度および

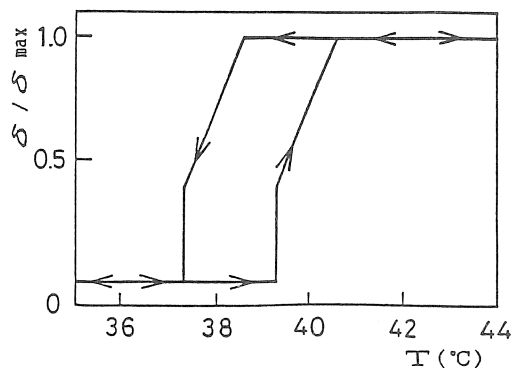
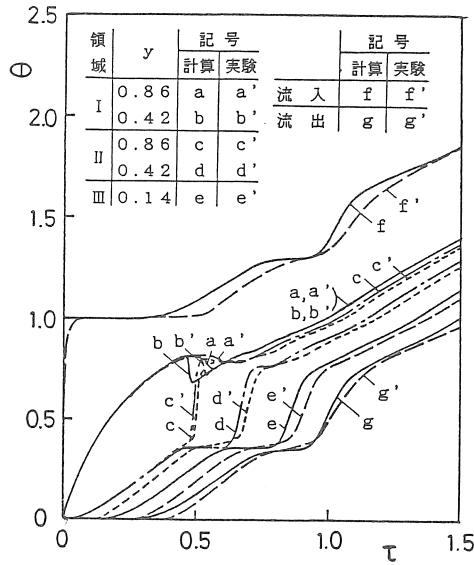
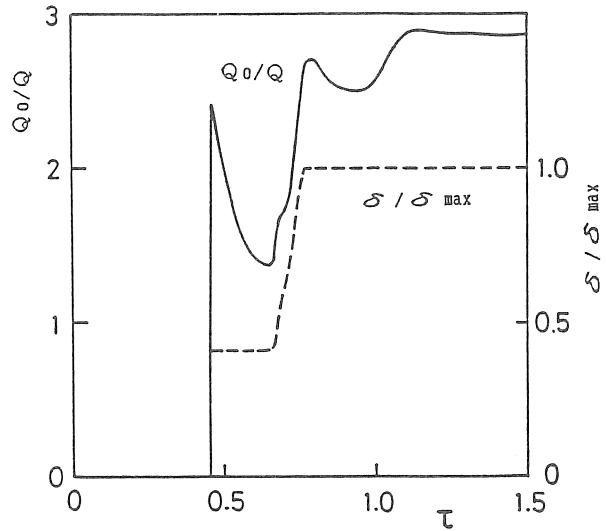


図8 弁の開度と温度との関係 (数値シミュレーション)

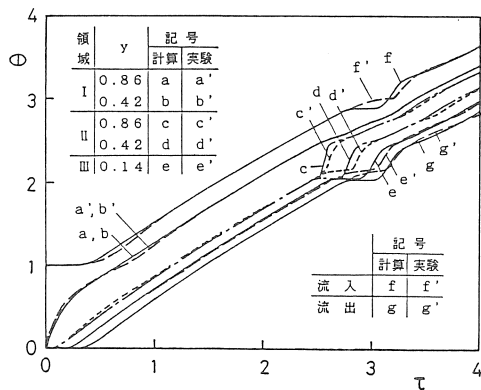


(a) 温度応答

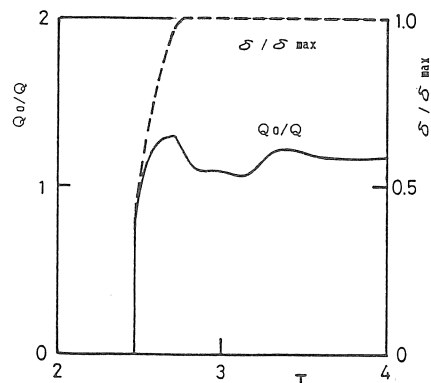


(b) 弁を通る流量と弁の開度

図9 数値計算と実験の比較 ($\Delta T=27.9^\circ\text{C}$, $T_0=16.5^\circ\text{C}$, $Q=0.86\text{l/min.}$)



(a) 温度応答



(b) 弁を通る流量と弁の開度

図10 数値計算と実験の比較 ($\Delta T=9.2^\circ\text{C}$, $T_0=16.8^\circ\text{C}$, $Q=1.76\text{l/min.}$)

各領域における密度, 添え字 $j=1, 2, 3$: 領域 I, II, III, T: 各領域の上端

弁の開閉動作に対しては実験結果を参考に図8に示すように, 領域Iの上端の温度が 39.4°C 以上になると急に40%の開度 (δ/δ_{max}) となり, それ以後は 40.5°C になるまで徐々に開度が大きくなり 40.5°C を越えると 100%の開度が保たれるとした. 温度が下がる場合には図のようにヒステリシスを描いて閉じるものとした. 従って弁の開く時刻は領域Iの上端の温度経過によって定まる事になる. なお, 弁の開度によって弁の損失係数は変わらないとした.

4.2 計算結果と考察

図9(a), 図10(a)に, 計算により得られた各領域の温度応答を実験結果と対比させて示す. また各図(b)には計算により得られた弁の開度と弁を流れる流量も示してある. 図より知られるように温度応答の

全体的な特徴は, 弁が開く時間に若干のずれが生じることを除けば弁が開くことによる急激な温度変化も含めて数値計算結果と実験結果とは良く一致しており, 上記の仮定でシミュレーションが可能である. なお, 弁が開いた直後から弁が完全に開くまでの弁の動きと槽内の温度経過の関連を実験では詳細に知ることは困難であるが, 数値シミュレーションによれば, 次のようにその関連を知ることが出来る. すなわち, 集熱条件によって弁開後の弁を通る流量 Q_0 と集熱回路の循環流量 Q との比が異なり, Q_0/Q が1よりかなり大きいと図9(b)のように弁はステップ状に開くが, Q_0/Q が1に近いと図10(b)のように弁は連続的に開く. この Q_0/Q の値によって弁の開き方が異なる理由は次のように考えられる. 弁が開くと, その直後に弁を通り, 領域Iから領域IIへ温水が流出し, その流量 Q_0 が領域Iへの集熱回路からの流入高温水の流量 Q よりも大きいと, それらの差である $Q_0 - Q$ の

量の領域Ⅱの最下端の温水が領域Ⅰへ流入してくる。ここで、領域Ⅱ下端の温度は低いので、 Q_0-Q が十分に大きいと、それが集熱回路からの流入高温水と混合しても、その混合温度はその時点に領域Ⅰの下端付近に蓄熱していた高温水の温度より低くなる。その結果領域Ⅰの下方の温度が上方の温度より低くなり、その部分で温度成層が現れる。(図9(a)において、記号a, bの温度が時間経過と共に下がり、測定点が下方に位置する記号bの方が早く下がる)。一方領域Ⅱの上方の温度は領域Ⅰから流れ込んだ高温水により急激に温度上昇するので、領域Ⅰの平均温度と領域Ⅱの平均温度の差が小さくなる。このことは弁を流れる駆動力を減らすこととなるので弁を通る流量 Q_0 は急激に減少する(図9(b))。従って、領域Ⅱ下方の低温水(Q_0-Q)と集熱回路からの流入高温水 Q との混合温度は領域Ⅰの下端の温度よりも高くなり、その近傍で混合が生じると共に先述の温度成層する範囲は上方へ移動する。しかし領域Ⅰの下方に生じる混合の範囲は領域Ⅰの上方までは及ばないため弁開後しばらくの間は領域Ⅰの上方、すなわち弁の周辺の温度は変わらないので弁の開度も一定に保たれる(図9(b))。そして、集熱回路からの流入温度が上昇し、また Q_0-Q が小さくなり、先述の混合の範囲が領域Ⅰの全部に及ぶと、領域Ⅰの温度は徐々に上昇し、弁の開度も大きくなり全開する。それとともに弁を通る流量も定常値に落ち着く。一方、弁開直後に領域Ⅱ下端より領域Ⅰへ流入してくる流量 Q_0-Q が集熱回路からの流入高温水の流量 Q に比べて小さいか零となると(図10(b))、それらの混合温度はその時点に蓄熱されていた領域Ⅰの温水の温度よりも高くなり、その結果領域Ⅰは弁が開いても常にすべて混合域となり、単調に温度上昇するので(図10(a))弁の開度も最大値まで単調に増加する。

以上のように、一次元の簡単な仮定を設けた数値計算により実験結果を適切にシミュレートすることができ、槽内温度分布の過渡応答の解釈が容易となった。

これらの解析法を用いることにより、必要に応じた蓄熱槽の構造(各領域の配分、弁作動温度など)設計が可能である。

5. 結 言

本報では、著者らの考案試作した二重円筒形温度別蓄熱槽の連通穴部に所定の温度で開閉する弁を取り付けることにより、領域Ⅰの温水の立ち上がりの早い昇温化を目指した実験を行うとともに、弁の開閉を考慮した槽内の温度経過の数値シミュレーション法を開発し、実験結果と比較検討した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 前報⁽¹⁾に示した連通穴部に弁を取り付けることにより領域Ⅰの立ち上がりの早い昇温化が実現でき、また弁開後は0.5~1換水程度の時間で温度応答は弁の有無に関わらず両者はほぼ一致する。
- (2) 温水を取り出す過程において弁の存在は取り出し温水の温度状態に悪影響を及ぼさない。
- (3) 本文に示した簡単な仮定を設けた数値シミュレーション法により実験結果を適切にシミュレートできた。本シミュレーション法は要求に応じた蓄熱槽の設計に有効である。

文 献

- (1) 竹内ほか：温度別蓄熱槽に関する一考察(第1報)，太陽エネルギー，Vol.12, No.3(1986)，37。
- (2) 竹内ほか：温度別蓄熱槽に関する一考察(第2報)，太陽エネルギー，Vol.12, No.4(1986)，30。
- (3) 竹内ほか：温度別蓄熱槽の特性解析，第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1987)，489。
- (4) 辻本ほか：蓄熱槽に関する研究(第1報)，空気調和・衛生工学会論文集 No.16(1981)，23。

(昭和62年12月23日 原稿受理)