

温度別蓄熱槽に関する一試案

(第1報 蓄熱過程の特性の吟味)

A PROPOSAL ON TEMPERATURE UNBLENDED-TYPE
THERMAL STORAGE TANK

(1st Report : Examination of the Storage Process)

竹 内 正 紀*
Masanori TAKEUCHI木 村 照 夫**
Teruo KIMURA安 川 敬 一***
Keiichi YASUKAWA

Abstract

The unblended-type thermal storage system with water such as the thermally stratified-type and the balance-type thermal storage tanks has been developed in recent years and is currently in use. They have, however, the disadvantage of reducing the available thermal energy due to the temperature drop of water in dependence of the variation of the heat source temperature or the temperature blending in high flow velocity into tank. Though the moving partitions and the baffles are effective to avoid the temperature blending in the different temperature storages, they require the complex and the expensive structure.

In this paper, we propose a novel structure of the unblended-type thermal storage system in which the tank is composed of vertical double cylinder without the partition on the bottom side of the inner cylinder. The measurement of the temperature distribution is made to examine the process of the thermal storage. The storages of the three different temperature levels are attained in accordance with the variation of the heat source temperature in the present tank.

Key Words Thermal storage tank, Storage process, Unblended-type, Vertical double cylinder, Three different temperature levels

1. 緒 言

蓄熱槽は温熱あるいは冷熱を一時的に蓄え、負荷側の一時的な需要増や熱エネルギーの発生時間と熱エネルギーの使用時間のずれなどに対応するために用いられる。熱源としては温度と供給量の安定した熱源設備による良質の熱エネルギーだけでなく、温度も供給量も安定しない工場廃熱や太陽エネルギーなどの劣悪なエネルギーも対象となる。このような場合に蓄熱槽が有効に作用するためには、水を蓄熱材とする蓄熱槽で温熱を蓄熱する場合を対象に考えると、次のような要件を満足することが望まれる。

(1) 蓄熱過程および温熱貯蔵中に槽内の高温水と低温水がいたずらに混合せず、その温度のまま保持できること。

(2) 熱源の温度が変動する場合には、その熱源の温度が蓄熱槽内の最高温度より低くなっても槽内の最低温度より高いかぎり、槽内の高温部の温度を下げることなく、熱源の温度に応じて温度別に蓄熱しうること。

(3) 蓄熱した温水を取出す場合には、槽内の高温水と低温水が混合することなく、高温水から順次取出せること。

(4) 蓄熱と取出しが同時間に起こる場合には、槽内の高温水と低温水が混合することなく、高温水から順次取出せるとともに熱源の温度に応じて温度別に蓄熱しうること。

これまでにも、以上の目的のために槽内の水の温度差による浮力を利用した温度成層形の蓄熱槽¹⁾²⁾や、バランス形の蓄熱槽³⁾が提案されている。しかし温度成層形では流入する熱源の水に温度変動が生じると、すでに蓄熱した高温水に好ましくない温度変化が生じ、またバランス形では熱源の水の流入速度が大きくなると温度成層形と同様の好ましくない温度変化が生

* 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

じる恐れがある．さらに隔離膜や仕切板などを用いて多槽形とし，水を温度別に蓄熱する工夫⁴⁾もなされているが，この形式は構造が複雑であり，コスト面，保守面に問題がある．そこで本報では構造が簡単で，流入する熱源の水をその温度に応じて温度別に蓄熱しうる蓄熱槽の設計に関する研究の一環として，二重円筒形の蓄熱槽を考案試作し，その蓄熱槽の蓄熱過程の特性と従来の蓄熱槽の特性とを比較検討することにより本研究で考案した温度別蓄熱槽の有効性を示す．なお蓄熱槽の有効性の評価は蓄熱された温水の取出し時の条件（使用流量，必要な流体温度など）を含めて考察すべきであるが，本報では第1段階としてとくに蓄熱過程に着目した．

記号

- P : ヒータの加熱量
 Q : 循環流量
 T : 蓄熱槽内任意位置の温度
 T_0 : 加熱開始前の槽内の平均温度（初期温度）
 T_{in} : 循環流の流入温度
 T_{out} : 循環流の流出温度
 t : 加熱経過時間
 t^* : 換水時間 $(=V/Q)$
 V : 蓄熱槽の体積
 x : 蓄熱槽の底面より鉛直上方に測った距離
 θ : 無次元温度 $(=(T-T_0)/(T_{in}-T_{out}))$
 ξ : 温度 θ から $\theta+\Delta\theta$ の間にある流体が蓄熱槽に占める割合
 τ : 無次元時間 $(=t/t^*)$

2. 実験装置と方法

図1に実験装置の系統図を示す．蓄熱槽①は内径480 mm，高さ720 mm，体積130 lの円筒形で，内部の流れが可視化できるように厚さ10mmの透明アクリル板でできている．蓄熱槽は常に満水状態になるように定水位タンク②から水が補給される．集熱回路は循環ポンプ③により蓄熱槽の底面中央より取出した水を流量計④，ヒータ⑤，三方弁⑥を経て再び蓄熱槽内の適当な位置へ流入させるような構成である．ヒータには交流200Vの電源から変圧器で適当に降圧した電力を供給し，その発熱量は電圧計と電流計で測定する．なお，流量計⑦は統報で報告するが，蓄熱された温水の利用時の流量を測定するものである．配管には温水用の塩化ビニル管を使用し，管路の適当な位置に空気抜きを設けた．また蓄熱槽と集熱回路はすべて厚さ25 mmのグラスウールで保温した．本報で考案試作した蓄熱槽は図2に示すように水槽（外槽）の天井にさら

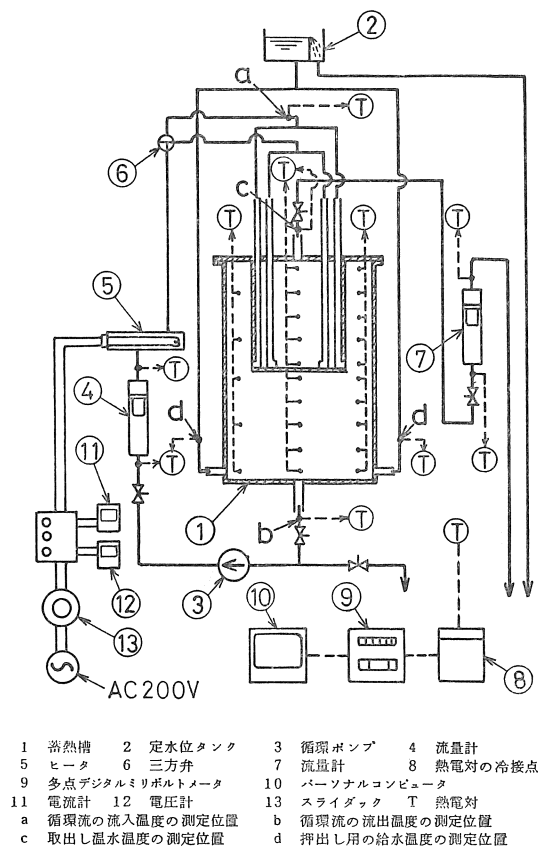


図1 実験装置の系統図

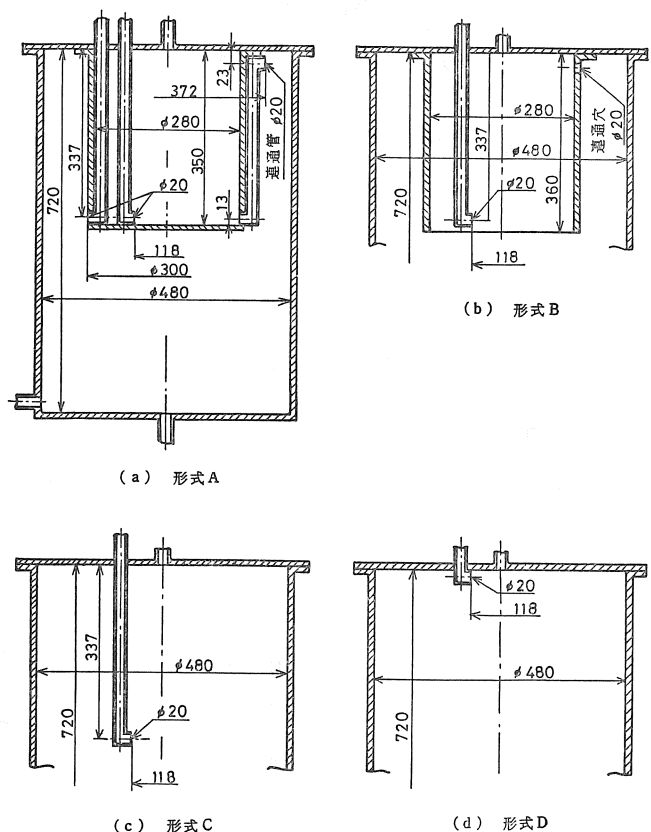


図2 蓄熱槽の形式

に体積の小さい内槽を取付けた形式A, および形式Aの内槽の底板を取除いた形式Bであり, これらの蓄熱槽との比較のために内槽のない形式C, および温水流入口の位置が形式A, B, Cとは異なり水槽の天井の真下にくる形式D (従来の温度成層形) も取扱った. 温水はいずれの場合も内径 20mm, 外径 26mm の温水用塩化ビニル管により, 中心に関して対称の位置で水平に中心方向に流入する. さらに形式Aでは, 温水がその温度によっては外槽へも直接流入できるように別の流入管を対称の位置に一对設けてある. また温水が内槽へ流入した場合には, それが外槽の上部に導かれるように温水流入管と 90° ずれた中心に関して対称の位置に一对の連通管を取付けてある. 形式Bでは内槽の温水が水槽の天井付近から外槽へ流出できるように一对の直径 20mm の連通穴を温水流入管と 90° ずれた対称の位置に設けてある.

水槽内の温度は 0.2mm 径のクロメル・アルメル熱電対で測定した. その温接点は図 3 に示すように水平断面内に A~E 点の 5 ケ所, 高さ方向に 10 ケ所 (E 点のみ 5 ケ所) の合計 45 ケ所の位置に設置した (図中に 1~45 の番号で表示). さらに 図 1 に示すように集熱

回路を循環する温水の流入温度と流出温度 (図 1 に記号 a, b で表示) および流量計出入口を通過する温水温度も測定した. また統報で報告する予定の蓄熱された温水の取出し実験の際には取出し温水の温度と押し出し用の給水の温度 (図に記号 c, d で表示) も測定した.

実験は次の手順で行った. すなわちあらかじめ蓄熱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に循環させ, 槽内の水が一様な温度になったところでヒータの電源を投入して実験を開始し, それ以後適当な時間間隔ごとに各部の温度を測定記録した.

3. 実験結果と考察

実験条件を表 1 に示す. 実験 No. の記号 A~D は蓄熱槽の形式 A~D に対応している. 表に示されるように実験条件は温度上昇をほぼ等しく (約 9°C) 保ち, 循環流量を変えた No. 1~3 と, 循環流量をほぼ等しく (約 0.9 l/min) 保ち, 温度上昇を変えた No. 3~5 より構成されている. なお, 形式 A では内槽に流入する場合のみを示してある.

表 1 実験条件 (1)

実験 No.	加熱量 P kW	循環流量 Q l/min	流入速度 u cm/s	換水時間 t* min	初期温度 T ₀ °C	温度上昇 T _{in} -T _{out} °C
A-1	1.674	2.60	6.89	48.4	21.90	9.23
A-2	1.122	1.74	4.62	72.3	20.72	9.26
A-3	0.566	0.82	2.17	154.2	19.86	9.95
A-4	1.110	0.84	2.22	150.5	19.49	19.02
A-5	1.681	0.88	2.34	142.3	19.44	27.27
B-1	1.674	2.63	6.98	47.8	19.15	9.12
B-2	1.139	1.79	4.75	70.4	19.38	9.14
B-3	0.559	0.85	2.25	148.3	19.32	9.44
B-4	1.132	0.83	2.21	151.1	19.41	19.49
B-5	1.673	0.86	2.28	147.1	19.46	28.06
C-2	1.122	1.82	4.81	71.6	19.43	8.86
C-3	0.559	0.89	2.36	146.4	19.53	9.02
C-4	1.122	0.88	2.33	148.2	19.45	18.33
D-2	1.108	1.83	4.70	73.4	16.71	8.97

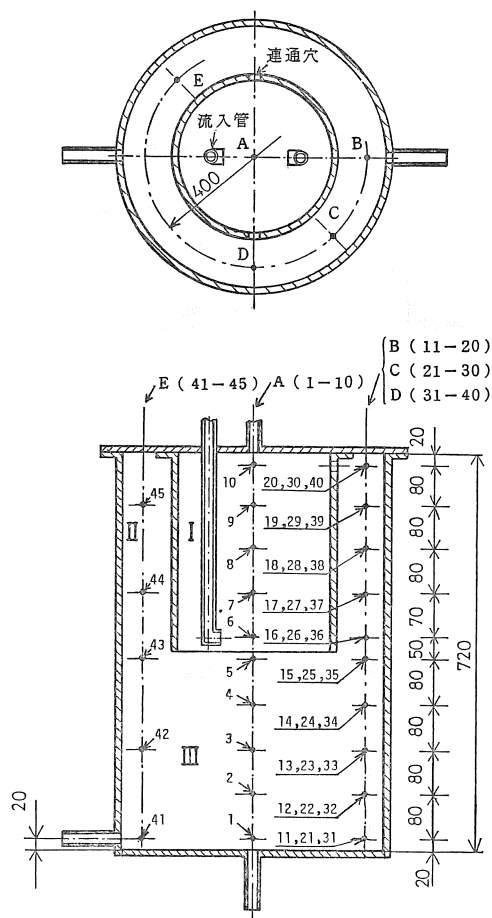


図 3 温度測定位置

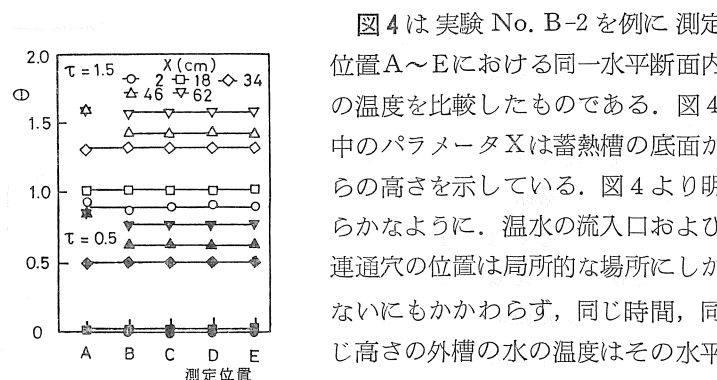


図 4 槽内水平方向温度分布 形式B (実験 No. B-2)

図 4 は実験 No. B-2 を例に 測定位置 A~E における同一水平断面内の温度を比較したものである. 図 4 中のパラメータ X は蓄熱槽の底面からの高さを示している. 図 4 より明らかに, 温水の流入口および連通穴の位置は局所的な場所にしかないにもかかわらず, 同じ時間, 同じ高さの外槽の水の温度はその水平面上の場所にかかわらず, ほぼ一致する. この同じ水平断面では温度が一様であるという性質は他のすべて

の実験についても同様に成り立った。図5は蓄熱開始後の蓄熱槽内の温度経過を一例として各形式のNo. 2について示す。なお先述のように同一水平断面の温度は一樣であるため、図5には形式A, Bでは内槽について図3に示す測定位置Aの、外槽について測定位置Dの温度経過を、また形式C, Dでは測定位置Dの温度経過を示した。図5中の数字は図3に示す熱電対番号である。また形式A, Bでは内槽と外槽とで温度の過渡応答の様子が異なるため、今後便宜的に図3に示すように内槽の内側の領域を領域I、内槽外側と外槽とでつくられる環状の領域を領域II、内槽の底面より下の領域を領域IIIと呼ぶ。形式C, Dでは内槽と外槽の区別はなく、形式Cでは循環水流入口より上方が形式A, Bの領域I、下方が領域IIIに。形式Dではすべての領域が領域IIIに対応する。形式A, Bの領域I(熱電対番号6~10)では内槽内の水と流入温水が混合した混合温度を示しながら加熱後直ちに温度上昇を開始する。しかも循環流流入口からの噴流の影響を受ける中央部では時間的にも温度の変動が大きい。領域II(熱電対番号36~40)、III(熱電対番号1~5, 31~35)では下方の流体ほど遅れて温度上昇し、さらに先述のような時間的な温度変動もみられない。また図5(a), (b)を比較すると後述する細部を除けば内槽の底板の有無は過渡応答に大きな影響を与えないといえる。形式Cにおいても領域I(熱電対番号36~40)の温度は形式A, Bの領域Iと同様、一樣な温度を示すが領域の体積が形式A, Bよりも大きいため、その温度は形式A, Bよりも低くなる。従来の温度成層形の形式である形式Dでは温水流入口が槽内最上部にあるため、上層の流体ほどよりはやく温度上昇する。

次に循環流量、温度上昇(加熱量)の影響を考察する。図6は各蓄熱槽について、無次元時間 $\tau = 0.5$, 1.0 および 1.5 における槽内の温度分布を示す。図6に示す形式A, Cでとくに顕著に見られるように、実験条件によらず同一の無次元時間における槽内の無次元温度分布はほぼ一致する。しかし τ が大きくなるとデータのばらつきが見られ、換水時間の長いもの、温度上昇の大きいものほど同一無次元時間の温度が小さくなっている。これは τ が大きくなると、蓄熱槽内の温水と外気との温度差が大きくなるため、熱損失も若干大きくなることによると思われる。

形式A, Bについて領域別に温度分布をみると、領域Iでは τ の値にかかわらず高さ方向に温度の差がなく、流体は混合しながら温度上昇する。また連通管あるいは連通穴を通して領域Iの流体が領域IIの上部へ運ばれるため、領域II, IIIでは高さ方向に温度こう配

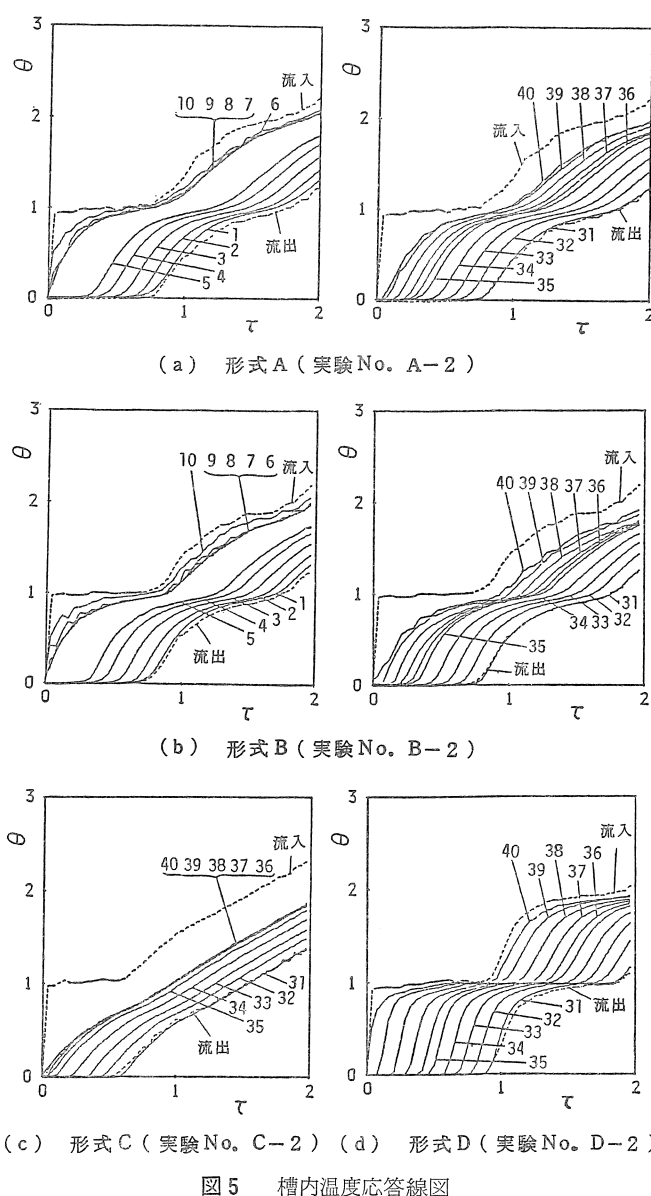


図5 槽内温度応答線図

を生じ、温度成層する。その温度こう配は時間経過と共に急緩を繰返しながら蓄熱されていく。その結果、領域Iが高温、領域IIIが低温、領域IIがその中間温度となる。とくに形式Bでは領域Iから連通穴を通して領域IIへ流出する流量は領域Iと領域IIの温度差による循環力によって定まると考えられるが、実験においてこの流量を実測できなかった。しかし連通穴を通る流れの損失係数を1.5とし、各時間において実測された領域I, IIの温度に対応する水の密度の差を用いて連通穴を通る流量を試算すると³⁾、B-2では循環流量と連通穴を通る流量がほぼ一致し、B-1では循環流量が連通穴を通る流量よりも多く、B-3, B-4およびB-5では循環流量が連通穴を通る流量よりも少なくなる。図6より知られるように、この連通穴を通る流量と循環流量とが一致する場合(B-2)の温度分布は

内槽に底板がある形式Aの蓄熱槽の同じ実験条件(A-2)の温度分布とほぼ一致する。また循環流量の方が多い場合には循環流温水は領域Ⅰよりもはみ出し、領域Ⅲの水の温度上昇にも直ちに關与することになる。一方、循環流量の方が少ない場合には、領域ⅠとⅡを循環する流れが生じ、それぞれの領域の温度が均一化される傾向にあり、それらの領域間の温度差が小さくなると共に図6のB-4とA-4、B-5とA-5とを比較すると領域Ⅰの温度は形式Aの蓄熱槽よりも低くなるのがわかる。形式Cでは実験条件によらず全体的にほぼ同じ温度分布を示し、領域Ⅰでは温度が一様となり領域Ⅲでは温度成層する。形式Dでは流入する温水が混合せず成層して蓄熱されるため、形式Cに比べて流入する温水と槽内の冷水とが明確に分離しており、その境界付近の温度こう配が大きいことがわかる。図6を基にして、ある温度 θ から $\theta + \Delta\theta$ の間にある流体の体積と蓄熱槽の体積との比を用いて、どの程度の温度の流体がどの程度蓄熱されるかを示すヒストグラムを $\Delta\theta = 0.1$ にとって各形式No.2を例に描くと図7のようになる。ヒストグラムの示す特性は蓄熱経過時間 τ によって異なるが、形式A、Bは形式Cよりも常に高温の水が蓄熱されている。しかも形式Dに比較して、それほど明確な差は生じていない。以上のように蓄熱槽内の水より高温の水が常に流入する場合には、形式A、Bは形式Cよりも高温水を蓄え、さらに形式Dと同程度の高温水を蓄えることが明らかとなった。なお、形式A、Bでは循環流の流入温度が領域Ⅰに蓄えられている温水の温度より高い場合には、領域Ⅰは混合形となり、領域Ⅰに新たに蓄熱される温水の温度は循環流の流入温度より低くなるが、この温度低下の程度は内槽の容量と循環流の集熱量によって定まるものである。

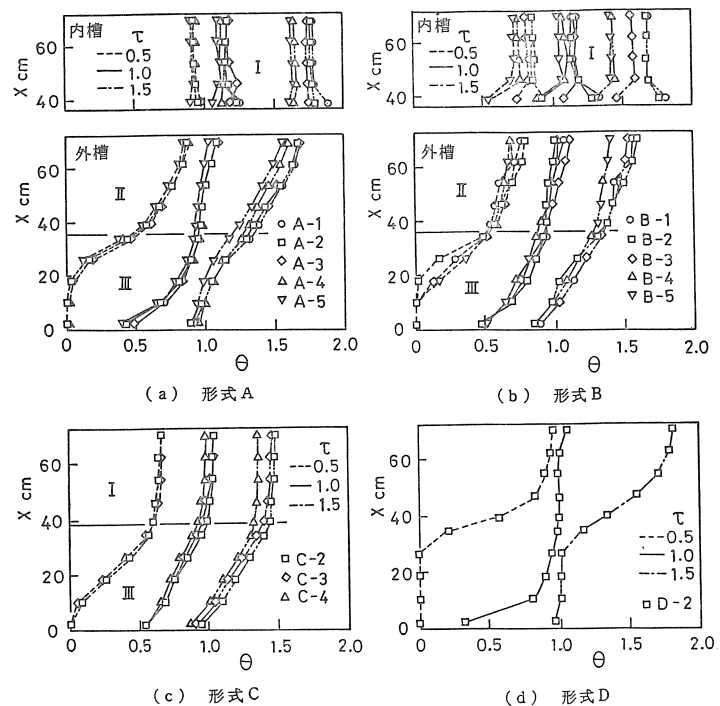


図6 槽内鉛直方向温度分布

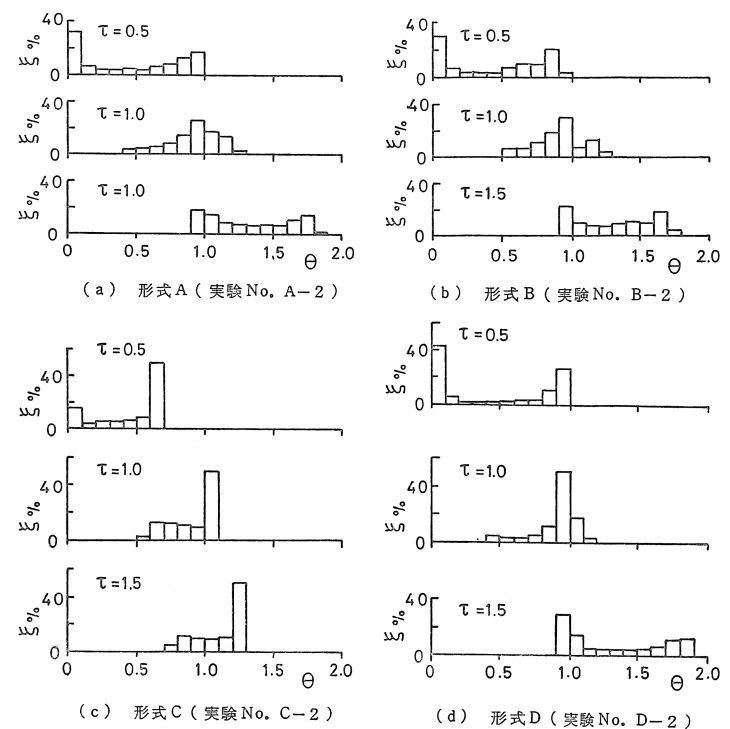


図7 ヒストグラム

実際の集熱器では以上の加熱条件のように常に一定の熱量が得られるとは限らず、場合によっては集熱量が減って蓄熱槽への流入温度が低下する場合も生じる。有効な蓄熱槽ではこのような変温入力に対しても槽内の高温域が保持される必要がある。そこで各形式の変温入力に対する温度応答を調べるため、各形式とも表2に示す条件で $\tau \div 1.5$ まで蓄熱した後、循環流量を蓄熱過程と同一のまま、極端な例として加熱量を

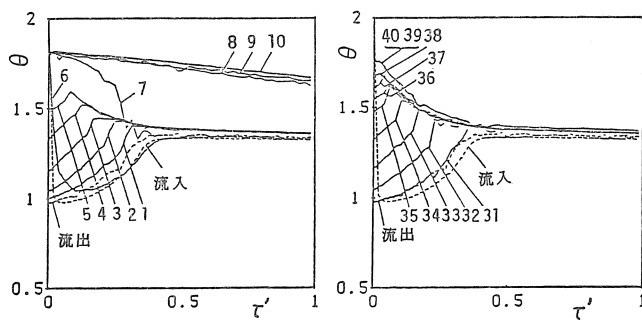
表2 実験条件(2)

実験 No.	加熱量 P kW	循環流量 Q l/min	換水時間 t^* min	初期温度 T_0 °C	温度上昇 $T_{in} - T_{out}$ °C	蓄熱終了時間 τ_e
A-2'	1.110	1.75	71.7	17.32	9.07	1.62
B-2'	1.125	1.78	70.8	17.64	9.08	1.55
C-2'	1.108	1.76	73.9	17.55	9.03	1.49
D-2'	1.148	1.77	73.6	17.02	9.31	1.50

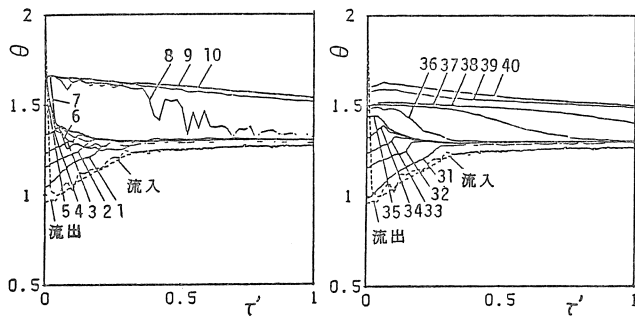
零とした場合の実験を行った。当然のことながらこの場合の流入温度は系の中で最も低いので、系外部への熱損失がないとすると槽内の蓄熱総熱量は変わることなく、槽内の温度分布が変化することになる。図8はこの変温入力に関する各形式に対する温度応答を、図9はヒストグラムを示したもので、無次元時間 τ' は加熱量を零とした瞬間の時間を $\tau'=0$ として示した。

また温度 θ は図4と同様に蓄熱過程時の $T_{in}-T_{out}$ で無次元化してある。図8、9より解るように従来の温度成層形の形式Dでは蓄熱槽の最上部より温度の低い流体が流入するため、槽内の流体は混合し、温度が均一化する。その温度は $\tau'=0$ における槽内の平均温度に近い値となる。すなわち形式Dでは絶えず槽内の温度よりも高温の流体が流入する場合には先述の様に高温のまま蓄熱可能であるが、低温流体の流入に対して一旦蓄熱した槽内の高温流体の温度が低下する欠点がある。

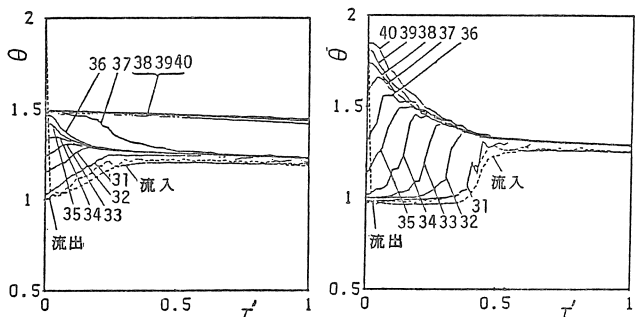
ある。流入口が槽内の中央部にある形式Cでは流入する流体の温度は槽内の温度よりも低いため、流入口より下方（領域Ⅲ）において流体は混合し、その領域の温度は均一化される。しかし流入口より上方では、流入口近傍高さで流入口からの噴流による混合攪拌のために温度低下がみられるのを除いて一旦蓄熱された高温流体は高温のまま保持される。したがってヒストグラムも高温域と低温域の2つのピークがみられる。内槽を設けた形式Bにおいても形式Cと同様、低温流体の流入により流入口より下方（領域Ⅲ）の流体は混合され、温度が均一化するのに対し、流入口より上方（領域Ⅰ、領域Ⅱ）では高温流体は混合されることなく高温に保持される。この形式では先述した様に、またヒストグラムからもわかる様に、形式Cに比較してより高温の流体が蓄熱されている。形式Aにおいて流入口を内槽に固定すると、低温流体流入時には図より明らかなように、流入口近傍高さの流体が混合、攪拌のため温度低下し、この温度低下した流体が連通管によって領域Ⅱの上方に運ばれるため、外槽の領域Ⅱ、Ⅲの温度は均一化され低下する。この場合は中温域の



(a) 形式A (実験No. A-2')



(b) 形式B (実験No. B-2')



(c) 形式C (実験No. C-2') (d) 形式D (実験No. D-2')

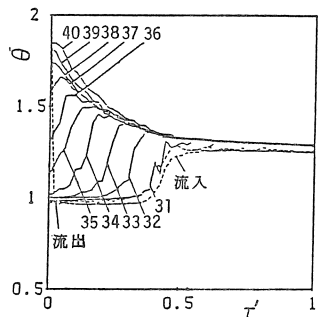
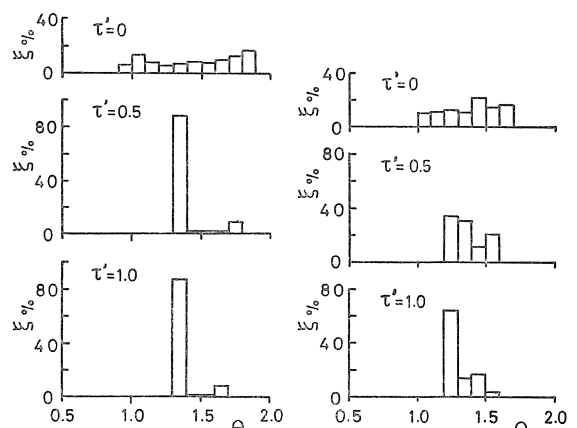
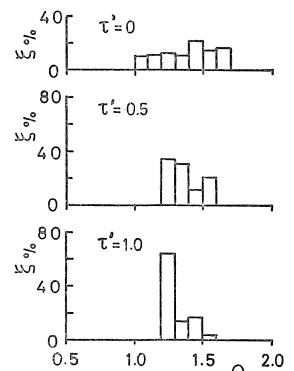


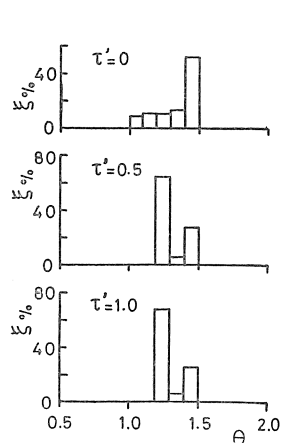
図8 槽内温度応答線図



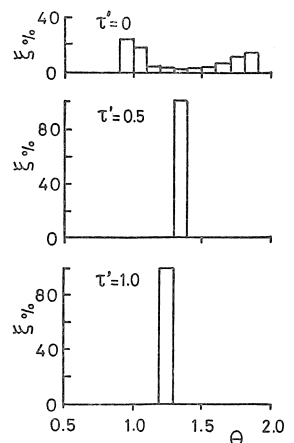
(a) 形式A (実験No. A-2')



(b) 形式B (実験No. B-2')



(c) 形式C (実験No. C-2')



(d) 形式D (実験No. D-2')

図9 ヒストグラム

領域Ⅱの温度も低下するため蓄熱槽として好ましくないが、低温流体が流入する場合には流入口を外槽（図2参照）に切換えてやると、領域Ⅰ，領域Ⅱの流体は高温のまま保持されることは容易に推察できる。しかし流入口の切換えには何らかのセンサーを必要とし、構造面，コスト面に問題が生じる。

4. 結 言

本報では構造が簡単で，かつ蓄熱材を温度別に蓄熱しうる蓄熱槽の設計に関する研究の一環として，二重円筒形の蓄熱槽を考案試作し，その蓄熱槽の蓄熱過程の特性を吟味した。その結果，本文で示す形式A，Bの蓄熱槽は槽内の高温水を低温水と分離して蓄熱でき，さらに流入する熱源の水に温度変動が生じても高温流体を有効に蓄熱しうる事が明らかとなった。とくに形式Bは構造も簡単であり，温度別蓄熱槽として効果的である。

参 考 文 献

- 1) 辻本誠・相良和伸・中原信生，蓄熱槽に関する研究 第1報—成層型蓄熱槽の槽内混合機構に関する実験的研究，空気調和・衛生工学会論文集 No.16 (1981)，23
- 2) 田中学・宮武修，蓄熱水槽の熱的動特性及び槽内現象に関する実験的研究，九州大学生産科学研究所報告，75号 (1983)，29
- 3) 奥宮正哉・中原信生，バランス型蓄熱槽に関する研究 第1報—実験による研究，空気調和・衛生工学会論文集 No.24 (1984)，21
- 4) R. T. TAMBLYN, Thermal Storage: Resisting Temperature Blending, ASHRAE Journal, (1980-1), 65

(昭和60年7月2日 原稿受理)