

住宅に対するニーズを考慮したカスケード型蓄熱システムの開発（その2） Development of Cascade-Type Heat Storage System (Part 2)

吉田 尚弘*
Naohiro Yoshida

萩谷 宏三**
Kozo Hagiya

佐藤 健一*
Ken-ichi Sato

城田 修司*
Shuji Shiota

杉村 正次***
Masatsugu Sugimura

要 約

本研究は、温度成層型蓄熱槽の特徴を利用するカスケード型蓄熱システムの開発を目的としている。カスケード型蓄熱システムとは、複数の熱源から得られる熱を水の密度差を利用して温度レベル別に蓄熱し、熱のカスケード（多段階）利用を図るシステムである。

前報では、カスケード型蓄熱の基本要素である温度成層現象を解明すべく既存評価法を使用し実験データの検討を行った。しかし、既存の方法では蓄熱水槽内で起こる現象を十分に評価しきれないことが明らかとなった。また、その評価法を用いてカスケード型蓄熱システムの性能を決定するパラメータについて検討を行った。今回は、新たな温度成層状況の評価方法を提案し、その実用性について検討を行ったので報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 蓄熱槽に関する実験の概要
- § 3. 新たな評価法の定義
- § 4. 実験データによる新評価法の検証
- § 5. おわりに

§ 1 はじめに

本研究開発は、高付加価値型集合住宅を開発目標の一つとした通商産業省住宅開発プロジェクトの一環として進められているものである。

近年、アメニティ志向の高揚に伴い、民生部門におけるエネルギー消費が増大する傾向にあるが、この現象に対して単にエネルギー消費量を抑制するのではなくライフスタイルや社会的ニーズの動向を考慮しエネルギーの有効利用を推進するといった視点が重要である。

前報では、住まい手のニーズ調査から今現在、居住空間に求められているものを明らかにした。さらに、住宅内でのエネルギーの使用状況を調査し、エネルギー使用上の問題点について検討を行った。その結果から、住宅におけるエネルギーの有効利用には、蓄熱技術の住宅への導入が不可欠であることが判明し、住宅用蓄熱システムについて開発を進めることとした。

具体的には、温度成層型蓄熱槽の特徴を利用するカスケード型蓄熱システムの開発を目標としている。カスケード型蓄熱槽とは、複数の熱源から得られた熱を温度別

* 技術研究所建築技術課

** 技術研究所環境研究課

*** 技術研究所機電課

に蓄熱し、水の密度差により生じる成層部分を温度別に利用するものである。ここでは、カスケード型蓄熱の核となる温度成層型蓄熱槽の基礎特性を評価する新たな方法を提案、検証を行ったのでその結果について報告する。

§ 2 蓄熱槽に関する実験の概要

2-1 実験目的

実験では、実験水槽内の温度分布と入口温度に対する出口の温度応答から成層状況を把握し、温度成層型蓄熱槽の特性を解明する。さらに、温度成層状況を表わす新たな評価法を検証するためのデータを取得する。

2-2 実験期間

基礎実験：1996年10月28日（月）～12月21日（土）

1997年 2月17日（月）～ 2月28日（金）

2-3 実験装置概要

図-1に、実験装置系統図を示す。実験装置は、実験槽（ $0.6\text{m}^{\text{W}} \times 1.8\text{m}^{\text{L}} \times 1.8\text{m}^{\text{H}}$ 、 $1.2\text{m}^{\text{W}} \times 1.8\text{m}^{\text{L}} \times 1.8\text{m}^{\text{H}}$ ）、冷水タンク、温水タンク、冷凍機、ヒーターで構成される。なお、実験槽は、可視化実験に対応できるように、前面をガラス張りとし、壁面は銅板で構成した（写真-1）。また、アクリル板で水槽を分割することにより 0.6m を基準に形状変化に対応できる。

今回の実験は、温水をステップ状に流入させ槽内状況

を確認することを目的としている。そこで、実験開始前に、槽内と同じ温度の流入水を循環させ、No.4～No.6の弁を瞬時に切り換えることで、ステップ入力に近い温水流入を可能としている。

また、今回の実験のように模型実験によって物理現象を解析しようとする場合、現象を左右する無次元数を抽出し、実物と模型の整合をとる必要がある。一般には、代表長さを入口管径としたアルキメデス数（ Ar_{in} ）が一致すれば、相似則が成立し、模型実験の結果を実物に適用できることが知られている。本実験では、 Ar_{in} 数による相似則を適用し、実物の蓄熱槽（高さ約30m）の1/16スケール模型実験を行う。写真-1に実験装置を示す。

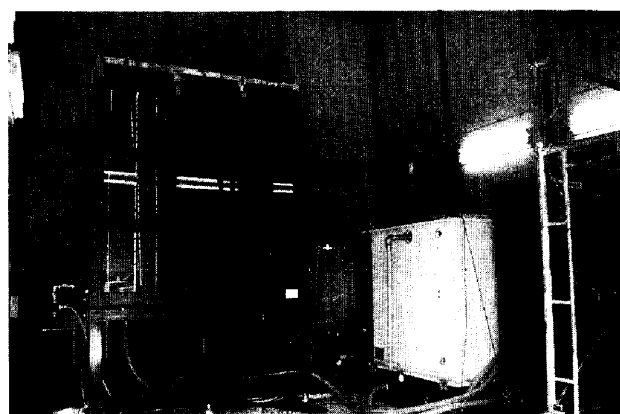


写真-1 実験装置

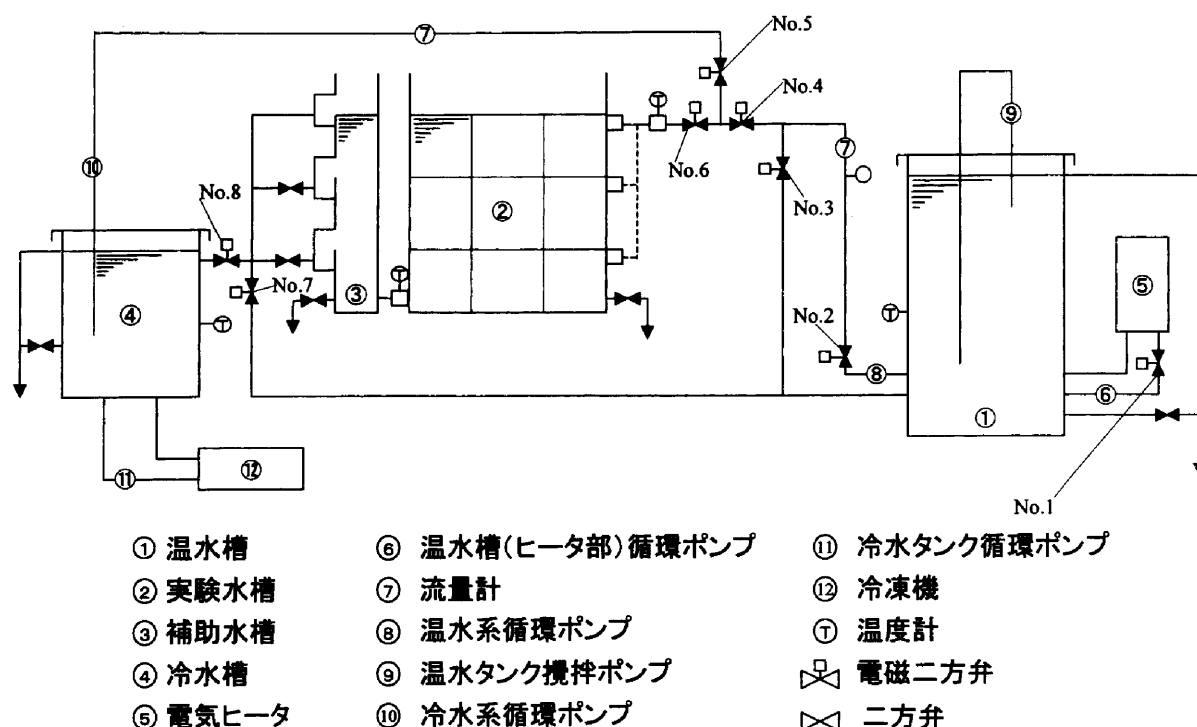


図-1 実験装置系統図

2-4 実験パラメータ

表-1に示すのパラメータを組み合わせ、実験パターンを決定し、代表的な79通りの温水流入実験を行った。

2-5 測定方法

表-2に測定項目を示す。実験槽内水温、流出入水温は、実験槽内の水の流れに影響が出ないように、CC熱電対（素線径0.1mm）を幅15mmのアルミ棒に固定し測定を行った。

また、壁部分からの熱授受により、槽内温度、出口温度は影響を受けると考えられるため、槽壁部分にあらかじめ断熱材（ウレタンフォーム：25mm）を施した。その上で、熱流量素子を用いて実験槽からの熱授受量の測定を行った。素子の設置位置は槽内の鋼板面およびガラス面の下端から40cmの箇所である。

実験番号の表記は表-3に示す通りで、実験水槽形状、管径、流量、温度差の順に一連の4文字の英数字で示してある。

§ 3 新たな評価法の定義

前報で述べたように既存の蓄熱槽評価指標である混合特性を表わすM値により槽内の温度成層状況を表現することは難しく、さらに温度成層の形成に影響を与えると考えられるパラメータの特性をつかむことはできなかった。そこで、新しい評価方法を提案し、槽内成層状況に影響を与える各パラメータについて検討を行う。

理想的な温度成層型蓄熱槽を、仮に槽容量に対する温水流入量の割合である換水回数0.5のときの垂直温度分布で表してみると、その槽内水深の1/2の地点で、初期槽内温度と流入水温度が完全に分かれる完全ピストン流となる。しかし、実際の蓄熱槽では冷水、温水が混合した領域が存在するため、図-2に示すように実験値による実測線の様な温度分布になる。

そこで、槽内垂直温度分布において、理想的な線と実験値による実測線で囲んだ領域を温度的に有効に利用できない部分と仮定し、この領域を温度死水域と呼ぶことにする。式-1に温度死水域の算出式を示す。

$$\text{温度死水域} = \int_{h=1-t}^{h=1.0} f(x)dx + \int_{h=0.0}^{h=1-t} f(x)dx \quad \text{注1}$$

・・・式-1

(注1 h:無次元高さ(槽の高さを1としたときの垂直位置)
t:換水回数 f(x):理想的な線-実測線 |)

また、評価を行う上で、温度死水域を除いた温度的に有効に利用できる領域が槽全体に対してどのくらいの割合を占めているのかを検討し、有効温度域形成率として

表-1 実験パラメータ

槽形状 (W [m]×L [m]×H [m])	0.6×0.6×0.6(A形状) 0.6×0.6×1.2(B形状) 0.6×0.6×1.8(C形状) 0.6×1.2×1.8(D形状) 0.6×1.8×1.8(E形状) 1.2×1.2×1.2(Z形状)
流出入管形状 ([m]×[m])	0.04×0.04 0.02×0.02
流量[m³/h]	0.24, 0.48, 0.96
<初期槽内温度[℃]－ 流入温度[℃]>	<15.0-20.0>,<15.0-25.0> <15.0-30.0>

表-2 測定項目

測定箇所	測定点	
槽内温度	熱電対	270点
出入口温度	熱電対	7点
出入口流量	電磁流量計	各1カ所
熱授受量	熱流量素子	3カ所

*本実験は形状を変化させるのでポイント数は実験槽容量が最大時のものである。

表-3 実験番号の表記

実験槽形状	管径	流量	温度差
A～E	1[0.04m]	2[0.24m³/h]	1[5℃差]
Z	2[0.02m]	3[0.48m³/h]	2[10℃差]
		4[0.96m³/h]	3[15℃差]

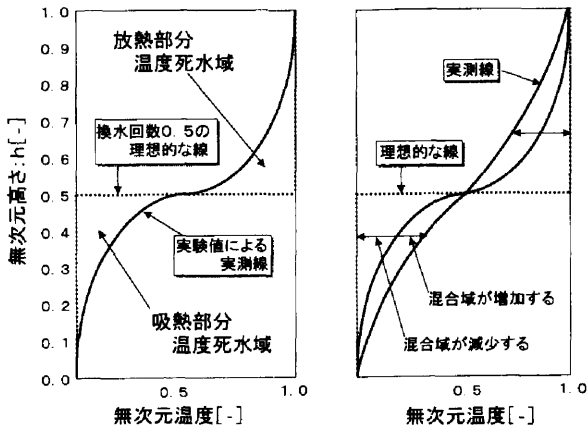


図-2 槽内状況模式図

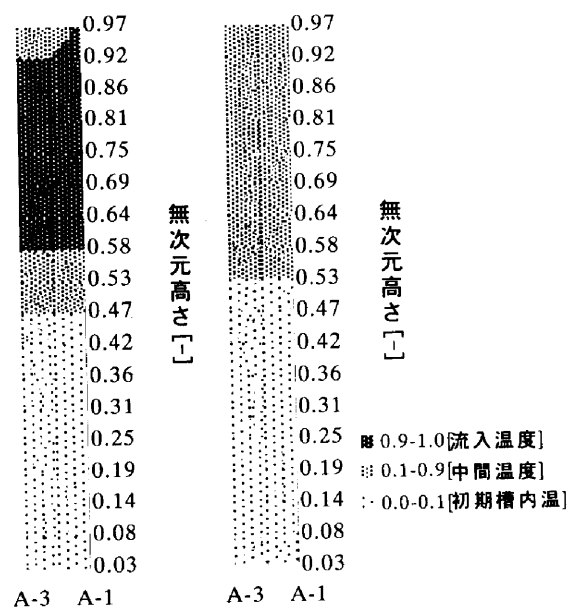


図-3 槽内温度分布の例

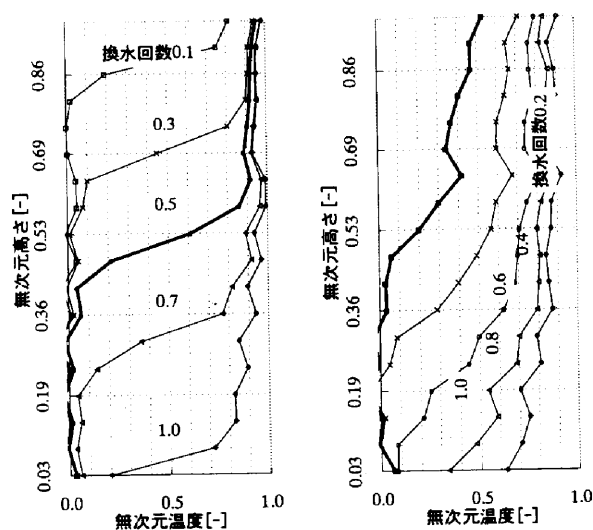


図-4 槽内垂直温度分布

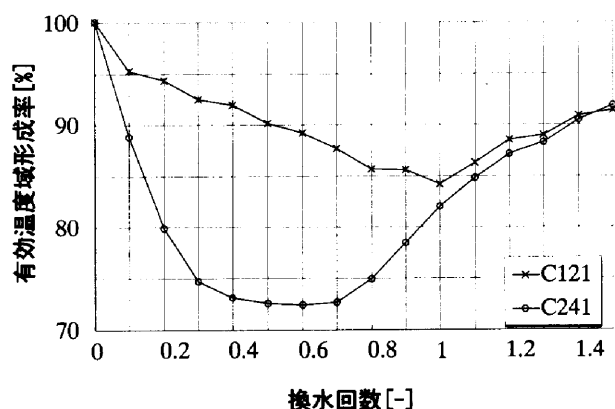


図-5 有効温度域形成率 (C121,C241)

定義した、式-2に有効温度域形成率の算出式を示す。

$$\text{有効温度域形成率}[\%] = 1 - \frac{\text{温度死水域}}{\text{槽全体}} \times 100$$

・・・式-2

定義した有効温度域形成率は、図-2の模式図に示すように、実測線が理想的な温度分布から離れることになり、混合域が増加する事を示し、近づくことにより混合域が減少する事を示している。

方法として、槽内温度分布と垂直温度分布で検討する方法が挙げられる。しかし、この2つの方法には、次のような欠点が存在する。

図-3に示すような槽内温度分布図だけでは、現実には実験パラメータの異なる実験の槽内状況も同様であると判断できる。しかし、図-4に示す垂直温度分布図を参照すると右に示したC121実験の方が明らかに槽内が乱れていることが確認できる。このように、二つの温度分布図を参照することで槽内状況を確認することができる。しかし、この方法では槽内を視覚的に捉えることしかできず、蓄熱効率といった定量的な評価は困難である。

現状では、温度成層型蓄熱槽の槽内状況を捉える。そこで、定量的な評価を行うために有効温度域形成率を用いる有効性について述べる。有効温度域形成率は、図-5～7に示す様な下に凸の二次曲線に似た変動をする傾向を示す。その曲線において値の変動が比較的小さい図-

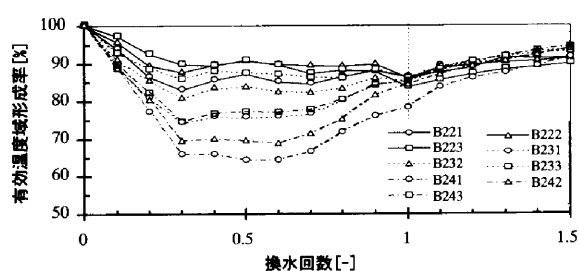


図-6 B2形状の有効温度域形成率

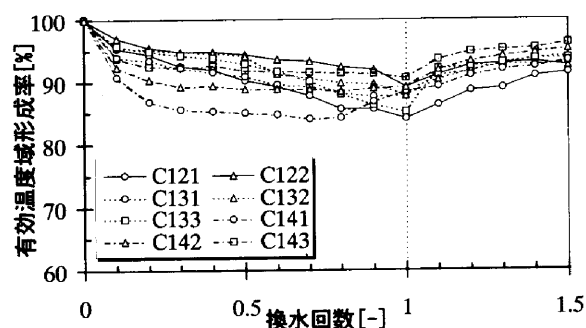


図-7 C1形状の有効温度域形成率

6中のB223実験は、図-8の垂直温度分布より成層状態が保たれることが確認できる。また、値が大きく変化しているB241実験は、成層状態が乱れていることが確認できる。従って、有効温度域形成率は時々刻々変化し、その変化の幅が大きい程、成層状態が悪いという事になる。

また、有効温度域形成率を用いて、式-2による温度死水域と流出口下の死水域を考慮すれば、槽内の混合部分を予測することも可能である。

また、有効温度域形成率は数値として算出できるため、定量的な評価ができ、成層状況を判断する場合において有効な手段であると考えられる。

図-6, 7に示す有効温度域形成率に関する共通の傾向としては、換水回数0.0~0.4にかけて徐々に値が減少し、換水回数0.4~0.6で最小値をとり、その後、再び値が増加する。換水回数1.0以上では、算出定義の性質上値が100%に近づいていく傾向となっている。また、図-6, 7に示すB, C実験における最も流量の少ない実験（流量 $0.24[m^3/h]$ の実験）に関しては、時間が進むにつれて値が低下している。この原因としては、その他の実験よりも実験時間が長く、夜間に実験を行ったことにより壁体からの熱損失の影響がわずかにあらわれたことが考えられる。また、他の形状についても同様の現象がみられるため、それらについては再実験を行い補正していく予定である。

§ 4 実験データによる新評価法の検証

有効温度域形成率は換水回数0.5前後で最小値を取る傾向がある。その最小値を推定することができれば、有効温度域形成率の曲線を予測することが可能である。今後、最小値の推定式を求めることが、重要であると考えられる。そこで、有効温度域形成率の影響をおよぼすパラメータについての分析を行う。

有効温度域形成率に影響を及ぼすパラメータとしては、水深、温度差、管径、流速などが挙げられる。これらの要素が相互に関与しながら、値を左右していると考えられるため、各パラメータごとに、有効温度域形成率の影響を考察する。

4-1 対向壁による有効温度域形成率に対する影響

図-9に示すような、流速（ $0.167m/s$ ）、温度差（ $15^{\circ}C$ ）の条件下では、対向壁による影響は見られない。しかし、図-10のような流速（ $0.667m/s$ ）の場合、対向壁の影響があらわれる。これは、流速が遅いときは槽内を流速による攪拌力より浮力による影響のほうが強いことが原因である。また、図-11に示すような対向壁のみの変化で

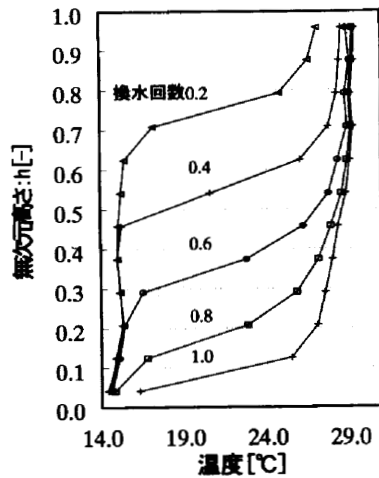


図-8 B223実験の垂直温度分布

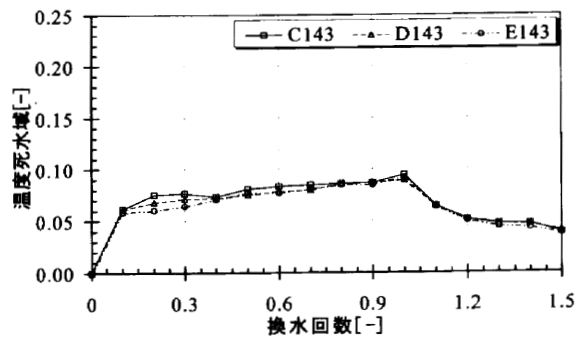


図-9 対向壁の影響 (1)
(流速 $0.167m/s$, 温度差 $15^{\circ}C$)

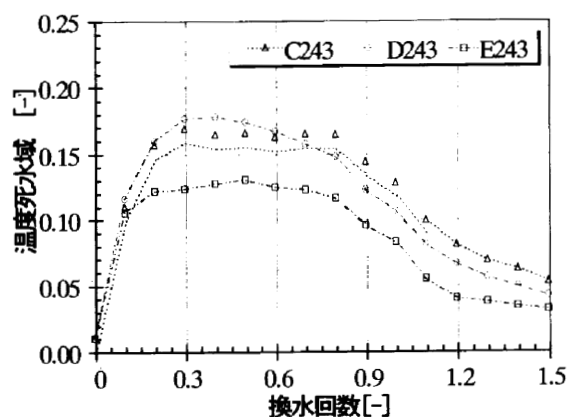


図-10 対向壁の影響 (2)
(流速 $0.667m/s$, 温度差 $15^{\circ}C$)

は、温度差による影響も見られ、温度差が小さい程対向壁による影響があらわれることが確認できる。

4-2 水深による有効温度域形成率に対する影響

水深による影響においても対向壁による影響と同様の

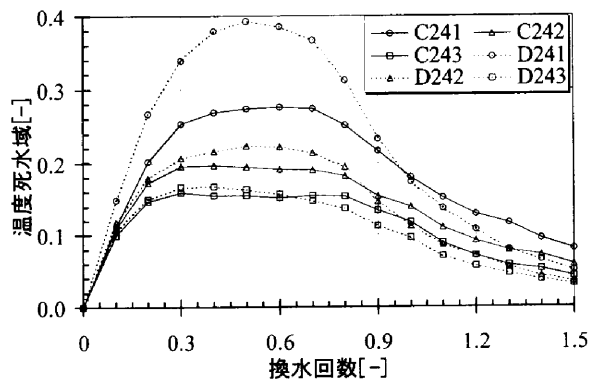


図-11 対向壁の影響 (3)
(流速0.167m/s, 温度差5,10,15°C)

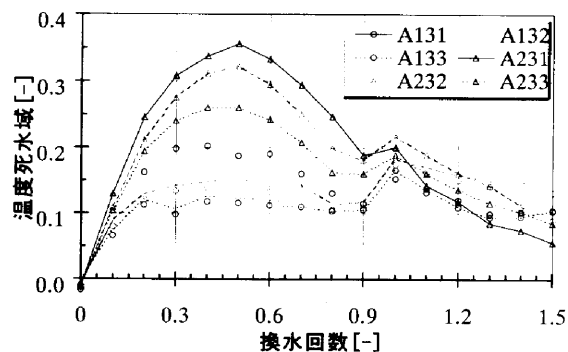


図-15 蓄熱槽内流速の影響 (1)
(流速0.083,0.333m/s, 温度差5,10,15°C)

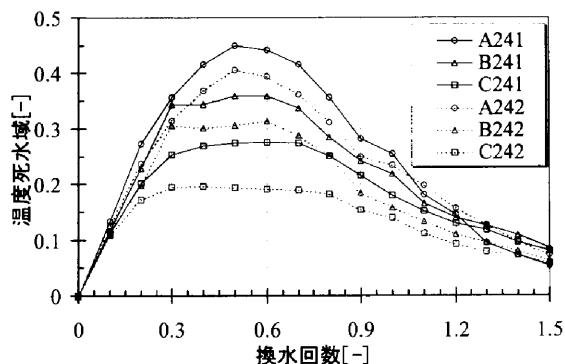


図-12 蓄熱水槽水深の影響 (1)
(流速0.667m/s, 温度差5,10°C)

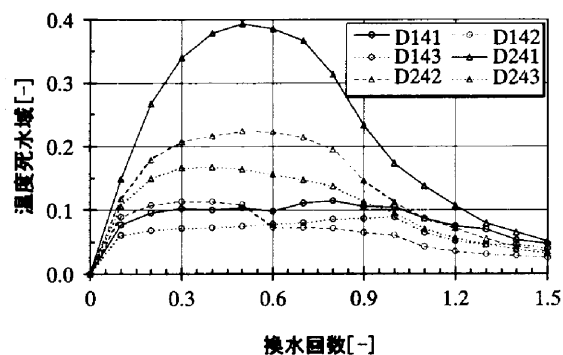


図-16 蓄熱槽内流速の影響 (2)
(流速0.167,0.667m/s, 温度差5,10,15°C)

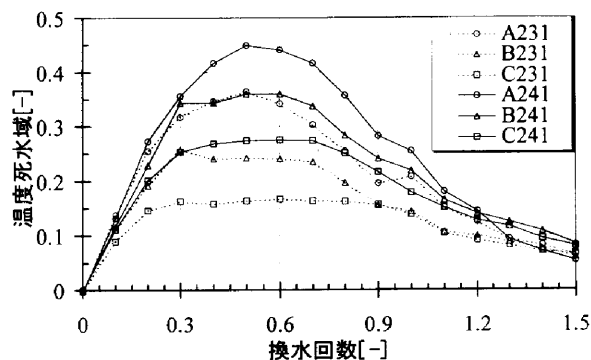


図-13 蓄熱水槽水深の影響 (2)
(流速0.667,0.333m/s, 温度差5°C)

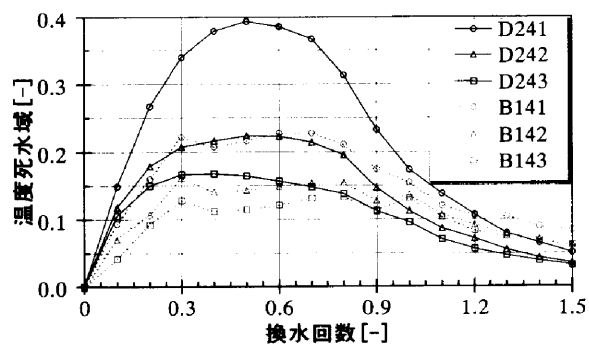


図-17 蓄熱槽内流速の影響 (3)
(流速0.667,0.167m/s, 温度差5,10,15°C)

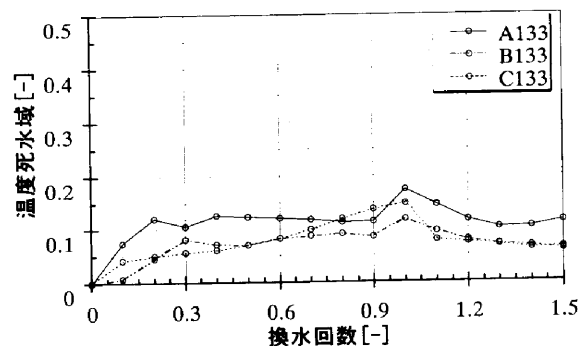


図-14 蓄熱水槽水深の影響 (3)
(流速0.167m/s, 温度差15°C)

傾向を示しており、流速と温度差によって水深別で異なる影響を受けていることが図-12,13によって判断できる。しかし、対向壁による影響と異なり、流速が遅く、温度差が大きい場合においても水深による影響を及ぼすことが図-14より判断できることである。また、水深による影響は対向壁による影響より大きいと考えられる。

4-3 流速に対する影響

図-15に示す流速のみが変化(同種の線)する槽容量が小さい場合においては、流速、温度差によって有効温度域形成率は影響される。しかし、図-16に示す槽容量が大きい場合においては、流速による影響がより大きくな

る。さらに、流速が大きく、温度差が小さい程、その影響が大きくなることが確認できる。これも、浮力と槽内を攪拌する力の関係によるものであると考えられる。

4-4 温度差による有効温度域形成率に対する影響

図-17のような流速、槽容量を固定（同種の線）して評価を行った場合では、温度差が小さいほど有効温度域形成率に大きな影響があることが確認できる。

§ 5 おわりに

今回の報告では実験の結果より、温度成層型蓄熱槽の評価法として、有効温度域形成率の定義を行った。これまで、槽内状況を確認するために槽内温度分布、垂直温度分布を参照してきた。しかし、それでは、槽内を視覚的に見ることはできず、定量的に評価することができなかった。そこで、有効温度域形成率を定義したことで、定量的な評価をすることが可能となった。また、有効温度域形成率の傾向および影響因子の特性をおおよそ捉えることができた。

今後、有効温度域形成率の傾向を明確にし温度成層型蓄熱槽の特性把握することを目的として研究を進める。さらに、カスケード型蓄熱槽を開発するための設計資料としても、充実させていく予定である。

なお、本研究開発は、通商産業省の「生活価値創造住宅開発プロジェクト」の一環として実施されたものである。また、蓄熱槽に関する実験は工学院大学建築学科中島研究室の協力を得て行われた。ここに深く謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 中島康孝：蓄熱槽（1）～（7）、空気調和衛生工学 VOL.54, No.5～No.11, 1979～1980.
- 2) 中島康孝：蓄熱槽の熱的重みに関する研究（その1）、日本建築学会論文報告集 第199号, 1972.
- 3) 空気調和・衛生工学会編：蓄熱式空調システム 基礎と応用, 丸善（株）, 1995.
- 4) 関信弘編：蓄熱工学 2 応用編, 森北出版（株）, 1995.