

# 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1）

## Development of Cascade-Type Heat Storage System – Part 1 –

吉田 尚弘\*  
Naohiro Yoshida

萩谷 宏三\*\*  
Kozo Hagiya

城田 修司\*  
Shuuji Shirota

杉村 正次\*\*\*  
Masatsugu Sugimura

森山 明彦\*\*  
Akihiko Moriyama

### 要 約

エネルギー資源枯渇の問題や地球環境の問題の観点から、エネルギー消費の低減は社会的な要請である。しかし、単純にエネルギー消費量を削るといった昔ながらの手法は、とかく利便性や快適性を犠牲にしがちである。人々の日々高度化する居住環境に対する要求を満たしつつ、エネルギー消費は増やさないというエネルギーの有効利用を図ることが重要である。本報では住まい手のニーズを調査し、現在居住空間に求められているものを明らかにしたのち、望ましい集合住宅像を探った。さらにこの集合住宅をエネルギーの有効利用の面からバックアップする蓄熱システムのあるべき姿を明確にし、技術開発上の問題点を整理した。また、水を媒体とした蓄熱に関する模型実験を実施し、蓄熱システムの高効率化にむけた基礎データを収集しまとめた。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 住宅に対するニーズ
- § 3. ニーズに対応した設備・施設
- § 4. カスケード型蓄熱システムの開発目標
- § 5. 温度成層型蓄熱槽に関する実験の概要
- § 6. 温度成層型蓄熱槽に関する実験結果
- § 7. おわりに

目的とした軽質油やLNGへの転換が行われ、石油危機以降は安定供給が重視された。エネルギー供給の安定性を確保するため、省エネルギーがその一つの方法として推進され多大な効果を収めた。一方、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。しかし、この現象に対して単にエネルギー消費量を抑制する手段を講ずるのではなく、ライフスタイルや社会的ニーズの動向を考慮しなければならない。

本論文では、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、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、蓄熱システムについて検討することとした。

### § 1. はじめに

日本におけるエネルギー問題の歴史を振り返ると、1960年代後半は大気汚染防止、特に硫黄酸化物の排出低減を

\* 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

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確認する実験の概要と結果について報告する。

## § 2. 住宅に対するニーズ

平成5年の「住宅需要実態調査」<sup>1)</sup>によれば、現在の日本の住宅について、「非常に不満」とする世帯の割合が11.4%、「多少不満」が38.0%である。この二つの合計である「不満率」は49.4%であり、半数近くの世帯で不満を抱いている。

### 2-1 広さに対するニーズ

表-1に示すように、一住戸当たりの延べ床面積は全国的に着実に伸びを見せている。

表-1 一住戸当たり延べ床面積の推移（全国平均）

|       | 延べ床面積 (㎡/戸) |
|-------|-------------|
| 昭和43年 | 73.86       |
| 48年   | 77.14       |
| 53年   | 80.28       |
| 58年   | 85.92       |
| 63年   | 89.29       |
| 平成 5年 | 91.92       |

住宅に対する不満の中身を見ると、「収納スペース」に対する不満がもっとも高く、その他の項目では、各室の広さに対する不満が多い。床面積は増加しているが、未だ十分でないことが推測できる。

### 2-2 快適な居住環境に対するニーズ

室内環境の質に対する要求も高まっている。このことは生活全体のレベルアップの反映であるという面もあるが、主に高密度化に応じて住宅の立地環境がますます悪化していることに原因がある。今後さらに高密度化した居住形態が一般化するものと思われるので、日本の高温多湿な気候条件の中でプライバシーを高度に保ちつつ、快適な室内環境を維持する技術への期待はますます高くなる。

### 2-3 生活行動の多様化から生じるニーズ

共働きの増加、就業形態の多様化、単身家族の増加など、従来的一般化された家族像を前提として住宅を計画

することが困難になりつつある。今後、家族の構成、家族関係、個々人の生活行動がますます多様化し、複雑化していくものと想定される。したがって、きめ細かくニーズに対応した家作りをするためには、高度にフレキシブルなシステムの採用が不可欠となる。

### 2-4 女性の社会進出にともなうニーズ

女性の社会進出の状況を見ると、家事についても主婦が行うものという固定概念は成立しなくなるであろう。家族の構成員のそれぞれが最低限の自立を果たし、衣類管理、清掃、炊事などを各自で行える設備を備える。その結果、ある一定の個人に家事が集中することなく、家族全員が平等な立場に置かれることになる。また、家事労働のうち、外部に発注できるものは外注化が進むと予想される。

### 2-5 余暇充実へのニーズ

労働時間の短縮、所得の増加により今まで以上に趣味・余暇のために費やされる時間が増加する。今までは団らん一辺倒であった家庭での余暇の過ごし方は、家族の構成員がそれぞれ個別にしかも個性的に楽しむ傾向に進むものと考えられる。したがって、ホビー室や工作室といった新しい空間へのニーズも次第に高まっていくものと思われる。

### 2-6 環境共生志向

地球規模の環境問題がクローズアップされたことから、環境共生型の生活を望む声も多い。住宅の生産・建設・維持・廃棄に関わるそれぞれの過程で、省資源・省エネルギーを図り、自然・未利用エネルギーを活用するなど、地球環境の保全について、適切な配慮を行うことが求められている。また、住宅の計画、構・工法、維持管理、住まい方などの面で、周辺の自然環境や地域社会等との調和を図る配慮が必要とされている。

### 2-7 高齢者対応

我が国の人口年齢構成は急速に中高齢化してきており、65歳以上の人口は平成2年には1,496万人で、総人口に占める比率は12%を超えることになった。

厚生省人口問題研究所では、表-2に示すように65歳以上の高齢人口の占める割合が増加傾向にあることから、高齢化は今後もますます進むものと推測している。

長い老後を快適に住まうということから、老人にとっての快適性・安全性・利便性の向上を配慮した住宅が望まれる。家庭内でつまづいたり、滑ったりして転倒する事故がかなり高い確率で起きており、安全最優先のきめ細かい住宅整備が望まれる。

表-2 日本における人口構成比の変化<sup>2)</sup>

|                    | 昭和45年           | 昭和55年           | 平成2年            |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 総人口                | 10,467<br>(100) | 11,706<br>(100) | 12,361<br>(100) |
| 年少人口<br>[14歳以下]    | 2,515<br>(24.0) | 2,751<br>(23.5) | 2,254<br>(18.2) |
| 生産年齢人口<br>[15~64歳] | 7,212<br>(68.9) | 7,884<br>(67.3) | 8,614<br>(69.7) |
| 老年人口<br>[65歳以上]    | 739<br>(7.1)    | 1,065<br>(9.1)  | 1,496<br>(12.1) |

(単位：万人 ( )内は構成比)

### § 3. ニーズに対応した設備・施設

ここでは、集合住宅を想定し、住まい手のニーズに対応するための手法および設備・施設について検討する。現在の日本における集合住宅の居住性能は、決して住まい手の満足を得られるような水準にはない。しかし、これは都市居住者の住まい方として定着しつつあり、潜在的な需要は極めて高いものと思われる。

集合住宅は、人口や諸機能が集中し、土地の高度利用が求められている都市において、費用等居住負担の軽減を図りながら快適性・利便性を追求する住まい方である。この快適性や利便性に関わる住まい手のニーズに対応する方法として、共用設備・施設の充実が有効であり、また、これは失われたコミュニティの復活や豊かな集住性の確保の一助となることは間違いない。

集合住宅において十分な広さを確保するための手法として考えられるものを以下に列記する。

- a. 住戸内収納物の排除
  - ・使用頻度の低い物品のための住戸外収納空間を確保する。
  - ・共用空間に専用パントリーを設置する。
- b. 共用設備の充実
  - ・使用頻度の低い機器を共有化し住戸内から排除する。
  - ・住宅設備機器を高性能・多機能化し共有化を図り、住戸内から排除する。

また、居住空間の快適性を向上させる手法としては以下のものが考えられる。

- a. 快適性の向上
  - ・全室空調を行う。
  - ・共用部分も空調を行う。
  - ・快適な半空調外部空間を設置する。

- b. 利便性の向上

- ・ホームオートメーションを導入する。
- ・生ゴミ処理設備を設置する。

生活の多様化に対応するものとしては以下のものが挙げられる。

- a. ライフスタイルへの対応
  - ・大型冷凍庫・専用パントリーを設置する。
  - ・ライフスタイルに合わせ間取りや設備の変更が可能なものとする。
  - ・雇用形態の変化に伴い在宅勤務を支援する情報機器端末を設置する。
- b. 共用施設の充実
  - ・健康性を増進するプール等を設置する。
  - ・リラクゼーションに有用なサウナ等の施設を設置する。

女性の社会進出を支える手法としては、次のようなものが考えられる。

- a. 家事労働の軽減
  - ・大型衣類乾燥機などの設置を考える。
  - ・生ゴミ処理設備を設置する。

余暇の充実を図る手法は以下の通りである。

- a. 余暇・趣味のためのスペースの確保
  - ・趣味作業のできる工作室等を設置する。
  - ・バーベキューができような屋外ヤードを設ける。
- b. 工具・設備の確保
  - ・趣味のための特殊な設備を共有化する。

環境共生を図る手法としては、次のようなものが考えられる。

- a. 地球環境の保全
  - ・高効率エネルギーシステムを採用し、省エネルギーを図る。
  - ・機器を集中化・共同化しエネルギーの有効利用を図る。
  - ・生ゴミを回収固化したり、堆肥化する設備を導入し、廃棄物低減を図る。
- b. 周辺環境との親和
  - ・建物のまわりに土や緑を多く残し、雨水を浸透させるようにする。
  - ・共同の菜園や花壇を用意し、住民の共生的活動を支援する。
- c. 住環境の健康・快適性
  - ・集会所や、余暇・趣味のための共用設備を充実させる。
  - ・外部の遊び場、広場などコモンスペースを充実させる。

高齢化社会を支える方法としては、以下のものがある。

- a. バリアフリー化
  - ・段差をなくすと同時に熱環境的なバリアフリー化を考える。
  - ・世代間交流ができる様なコミュニティスペースを設ける。
  - ・屋外に快適な空間を設ける。

## § 4. カスケード型蓄熱システムの開発目標

我が国が直面しているエネルギー問題として、地球環境問題への対応の他に、都市部では電力のピークカット・負荷平準化があげられる。最近の電力需要曲線の特徴は、電力駆動圧縮式ヒートポンプの急激な普及に伴い、夏期だけでなく冬期にもピークが現れるツインピークとなっている。一方、都市居住とエネルギーを考える際には100℃未満の低質な熱需要である冷暖房需要に対応する合理的なエネルギーシステムを再構築しなければならない。

このシステムを構築するための技術的な課題を大別すれば、排熱や未利用エネルギー利用のための熱回収技術、未利用エネルギー利用やピークカットを目的とした蓄熱技術および熱損失の少ない熱輸送技術となる。特に、蓄熱技術については、熱の有効利用のための温度レベル別蓄熱システム、より効果的な蓄熱を行うための潜熱蓄熱・ケミカル蓄熱技術の開発が望まれている。

通常、熱源として用いられるガス、石油等の燃焼温度は千数百度と高温であり、この熱を最初に100℃以下の加熱に直接使ってしまうのでは熱の持つポテンシャルを十分活かした利用法とはいえない。熱の合理的利用を図るには、カスケード利用（小さく分かれた滝の意味であり、温度レベルを考慮して何段階も熱を利用すること）が望まれる。

また、住まい手のニーズから集合住宅に設置することを想定した設備・施設等に関わる熱需要を整理すると以下ようになる。

- a. 温熱需要
  - ・共用ランドリー（衣類乾燥）
  - ・共用のプール
  - ・共用の大浴場
  - ・共用サウナ
  - ・共用の温室
- b. 冷熱需要
  - ・住戸外設置のパントリー
- c. 空調負荷（温冷熱需要）
  - ・共用部分の空調

- ・O Aルーム
- ・アスレチックルーム
- ・趣味のための室
- ・空調された半屋外空間
- ・トランクルーム

温度レベルからみると、衣類乾燥、サウナ等高温の熱を必要とするものから、主に給湯や温水加熱に用いられ居住環境温度より若干温度レベルが高いもの、空調負荷のように居住環境温度と同レベルのもの、およびパントリーに見られるように低温の熱を必要とするものの4つに大別できる。この多様な温度の熱需要に排熱等をその温度レベルを生かしつつ有効に利用しようとするれば、それぞれの温度に対応する蓄熱装置が必要となる。

したがって、住まい手のニーズを前提とし省エネルギー技術の一つとして蓄熱を考えた場合、具備すべき機能は以下に示すものとなる。

- ・多様な生活シーンを支えるため、温度レベル別蓄熱が可能なこと。
- ・熱の有効利用を図るためカスケード利用が可能なこと。
- ・生活排熱等未利用エネルギーの利用を前提とし、十分な省エネルギー性を持つこと。
- ・可能な限り低コストであること。

将来的には住宅にも導入されるであろうコージェネレーションも含め、上記の機能を満たすような蓄熱システムをイメージすると図-1のようになる。

蓄熱槽の中で起こる温度成層現象を利用し、複数の熱源から得られる熱を温度別に蓄熱する。蓄熱された熱はその温度に合わせ、有効に利用される。また、高温で利用され温度の低下した熱は、より低温側の蓄熱領域で再利用され、カスケード利用が図られる。

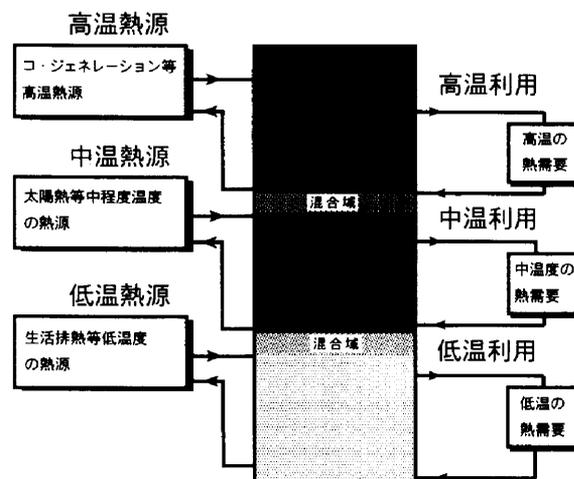


図-1 目標とする蓄熱システムの概念

## § 5. 温度成層型蓄熱槽に関する実験の概要

### 5-1 実験目的

この実験では、槽内の温度分布および入口温度に対する出口の温度応答を調べ、槽内の成層特性を把握し、温度成層型蓄熱槽の基礎特性を解明する。また、カスケード型蓄熱槽の開発のためのデータの蓄積も兼ねる。

### 5-2 実験装置の概要

図-2に、実験装置系統図を示す。実験装置は、試験水槽（0.6m×1.8m×1.8mと1.2m×1.8m×1.8mの2槽）、冷水槽、温水槽、冷凍機、ヒーターで構成される。なお、試験水槽は、アクリル製仕切板により0.6mを基準に形状変化に対応できる。

### 5-3 実験の方法

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する必要がある。蓄熱槽内の流れを規定する無次元数としては、アルキメデス数、オイラー数、エッケルト数などがあるが、一般には、アルキメデス数（ $Ar$ 数）が一致すれば、相似則が成立することが知られている。本実験では、 $Ar$ 数による相似則を用い、実物槽（高さ約30m）の1/16スケールの模型実験を行う。今回は表-3に示す実験パラメータの組み合わせにより、56とおりの実験を行った。

表-4に測定項目を示す。実験槽内水温、流入出水温

表-3 実験パラメータ

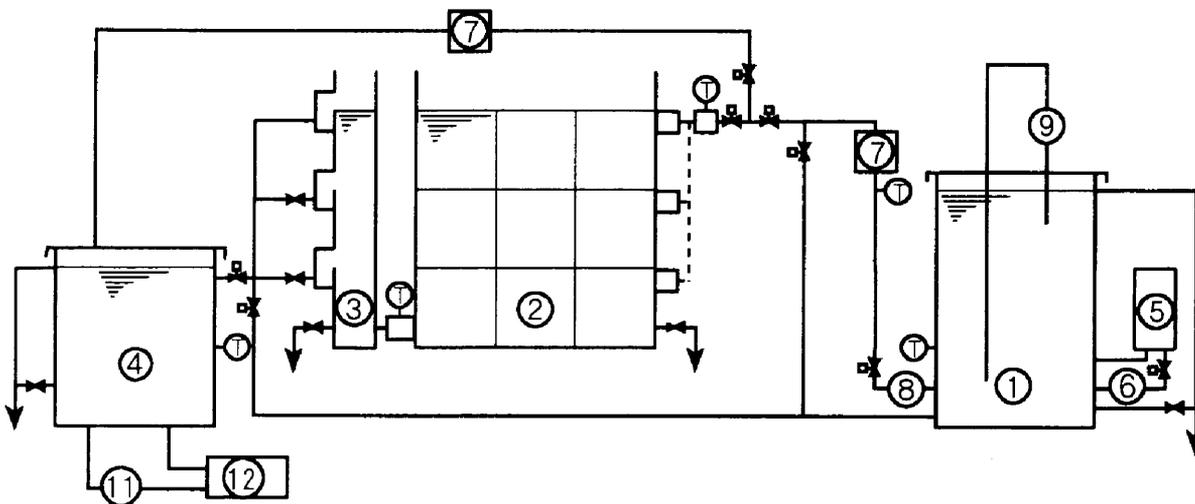
|                       |  |
|-----------------------|--|
| タンク寸法(m×m×m)          | 0.6×0.6×0.6(Aタイプ)<br>0.6×0.6×1.2(Bタイプ)<br>0.6×0.6×1.8(Cタイプ)<br>1.2×1.2×1.2(Zタイプ) |
| 流入出口寸法(m×m)           | 0.04×0.04, 0.02×0.02   |
| 流量(m <sup>3</sup> /h) | 0.24, 0.48, 0.96   |
| 流入水温度差(°C)            | 5.0, 10.0, 15.0  |

は、槽内の流れに影響が出ないように、直径0.1mmのCC熱電対を用いて、データロガーにて計測を行った。

表-4 測定項目

|          |                |      |
|----------|----------------|------|
| 実験槽内水温   | CC熱電対(φ=0.1mm) | 168点 |
| 流入出水温    | CC熱電対(φ=0.1mm) | 7点   |
| 流 量      | 電磁流量計          | 2点   |
| 装置外への熱損失 | 熱流量素子          | 3点   |

実験番号は表-5のように実験パラメータを示しており、槽形状、管径、流量、温度差の順で表示する。例えば、槽形状A、流入出口径0.02m、流量0.48m<sup>3</sup>/hおよび温度差15°Cの実験はA233と表わされる。



- ①温水槽
- ②実験水槽
- ③補助水槽
- ④冷水槽
- ⑤電気ヒーター
- ⑥温水槽（ヒータ部）循環ポンプ
- ⑦流量計
- ⑧温水系循環ポンプ
- ⑨温水タンク攪拌ポンプ
- ⑩冷水系循環ポンプ
- ⑪冷水タンク循環ポンプ
- ⑫冷凍機
- Ⓧ温度計

図-2 実験装置の概要

表-5 実験の種類

| 槽形状 | 流入出口径     | 流量                         | 温度差      |
|-----|-----------|----------------------------|----------|
| A~C | 1 [0.04m] | 2 [0.24 m <sup>3</sup> /h] | 1 [5°C]  |
| Z   | 2 [0.02m] | 3 [0.48 m <sup>3</sup> /h] | 2 [10°C] |
|     |           | 4 [0.96 m <sup>3</sup> /h] | 3 [15°C] |

表-6 相似則検討実験

| 実験番号                         | A223        | Z123        |
|------------------------------|-------------|-------------|
| 実験槽寸法(m)                     | 0.6×0.6×0.6 | 1.2×1.2×1.2 |
| 流入出口寸法(m)                    | 0.02×0.02   | 0.04×0.04   |
| 実験温度[°C]                     | 15 (槽内初期水温) |             |
| 槽内水初期密度 [kg/m <sup>3</sup> ] | 0.999127    |             |
| 流入水密度[kg/m <sup>3</sup> ]    | 0.995676    |             |
| 流速[m/s]                      | 0.17        | 0.24        |
| 流量[m <sup>3</sup> /h]        | 0.24        | 1.36        |
| アルキメデス数                      | 0.024       |             |

## § 6. 温度成層型蓄熱槽に関する実験結果

### 6-1 相似則の検討

実験結果を実物槽に適用することを考慮し、実験を行う前に、Ar数を一致させた大きさの異なる水槽の模型実験を行い、相似則の確認を行なった。比較を行った実験を表-6に示す。

なお、Ar数の算出には、式1を用いている。

$$Ar = d_0 g (\Delta\rho / \rho_0) / v^2 \quad (1)$$

$d_0$  : 流入口寸法 (m)

$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$v$  : 流速 (m/s)

$\rho_0$  : 槽内水密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\Delta\rho$  : 密度差 (kg/m<sup>3</sup>)

各実験を比較しやすくするため温度、高さ、時間の無

次元化を行う。槽内の高さ方向3点による温度応答の比較結果を図-3に示す。槽底部での温度のばらつきがあるものの、温度勾配は一致しており、槽内での熱的な挙動は同じと判断できる。また、槽流出温度の応答による比較を行っても、垂直温度分布と同様に、ほぼ温度勾配は一致している。この結果より、アルキメデス数による相似則は、適用可能ということでは以後解析を進める。

### 6-2 過渡応答線照合法

通常、槽内の混合機構の解析を行う際、槽内部の混合機構が複雑な場合は数学モデルの当てはめを行い、入力

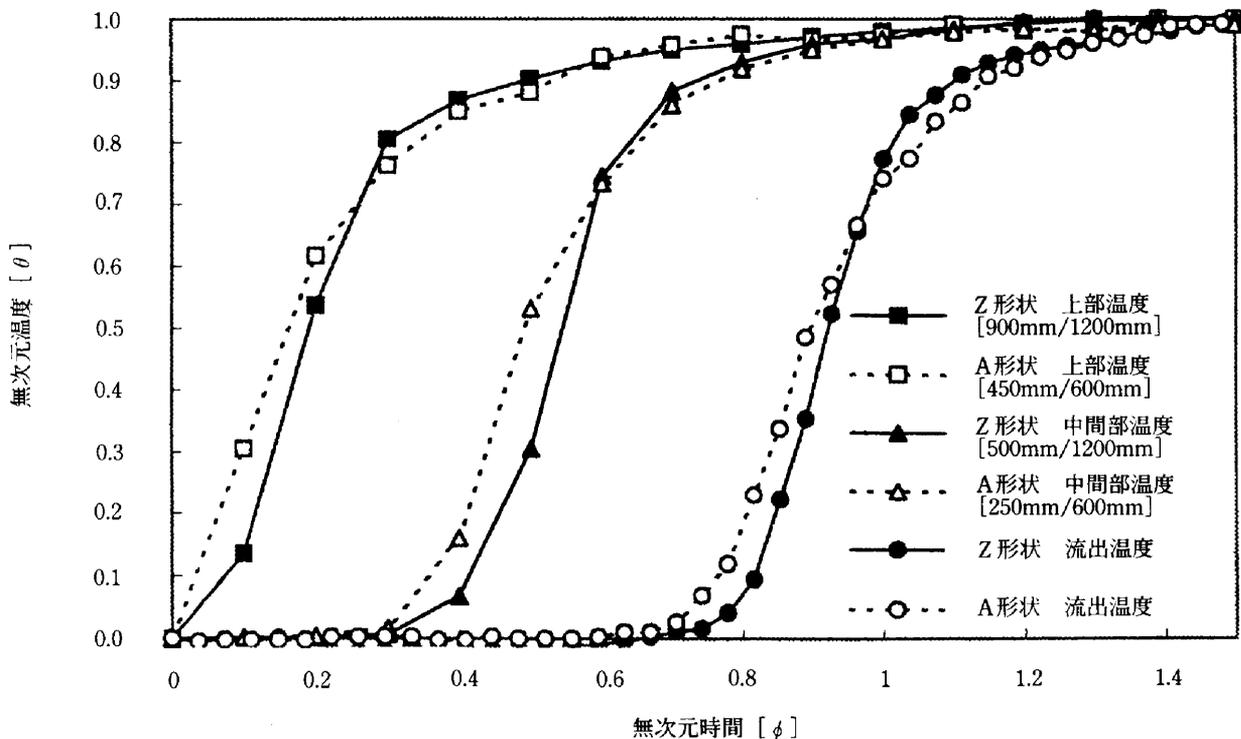


図-3 温度応答の比較

応答に着目し、拡散モデルという拡散法則に適合するモデルの数学的表現法を用いる場合が多い。中島<sup>3)</sup>は数多くの実験の結果、蓄熱槽が熱的に線形になっていることを確認した上で、拡散モデルの当てはめが適当であることから、見掛け上の混合特性を表す無次元数値 $M$ 値を尺度として用いた。

過渡応答線照合法とは蓄熱槽の入口温度に対する出口温度の変化をとらえるもので、図-4に示す過渡応答線図を用いて、有効容積率（ $P$ 値）、混合特性値（ $M$ 値）を算出し槽特性の評価を行う方法であり、実験値による過渡応答線をあらかじめ計算した過渡応答線（ $M=0.5\sim 100$ ）にプロットすることにより、評価を行う方法である。

6-3 過渡応答線照合法による評価法の検討

過去に温度成層型蓄熱槽の解析に過渡応答線照合法を用いた例はない。しかし、理論上、成層型蓄熱槽にも十分適用可能と考えられるので、今回の実験結果を過渡応答線照合法により評価を試みる。測定した出入口温度から、有効容積率、混合特性値を算出し槽特性の評価を行う。

有効容積率 $P$ とは、式(2)で定義される値で、実際に利用できる有効水量を表している。

$$P=1-(V'/V) \quad (2)$$

$P$ ：有効容積率

$V$ ：槽容量（ $m^3$ ）

$V'$ ：死水域容量（ $m^3$ ）

混合特性値 $M$ とは、槽内の混合の度合いを表すパラメーターで、 $M=0$ のとき完全混合流を表し、 $M=\infty$ のとき完全ピストン流を表す。

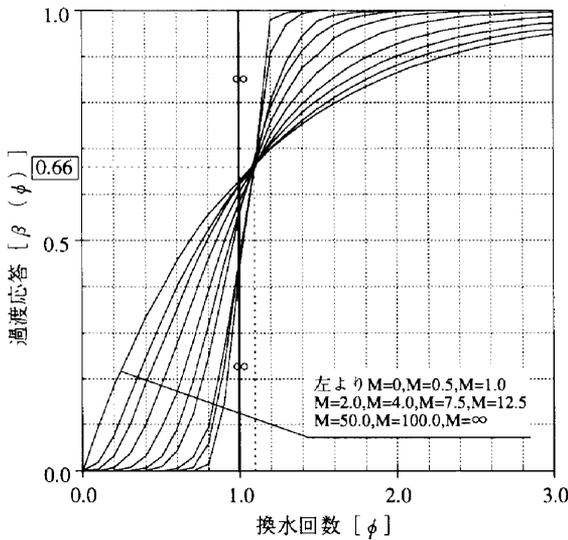


図-4 過渡応答線図

図-5に、照合結果を示す。A123の実験では、 $M=25$ の線に実験値の過渡応答が重なるが、B133とC133の実験では、換水回数が $\phi \leq 1.1$ までは $M=100$ のラインの外側に実験値があり、 $\phi \geq 1.1$ 以上では $M=100$ のラインの

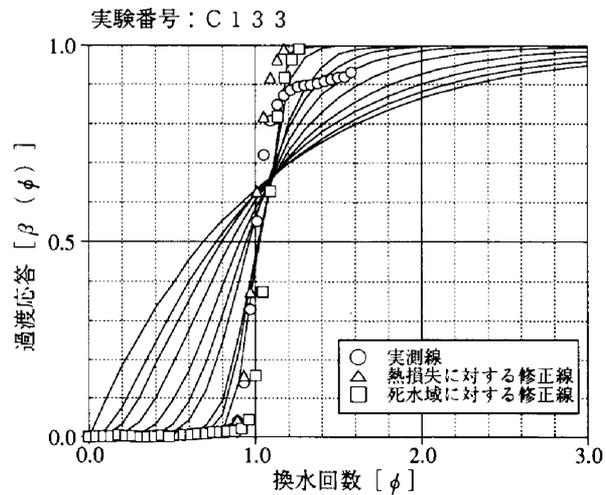
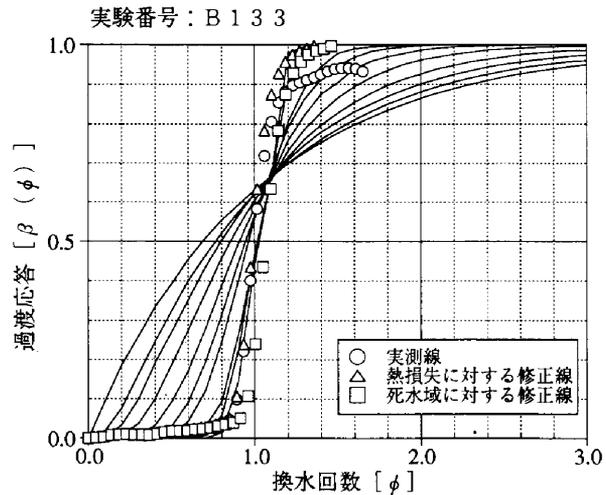
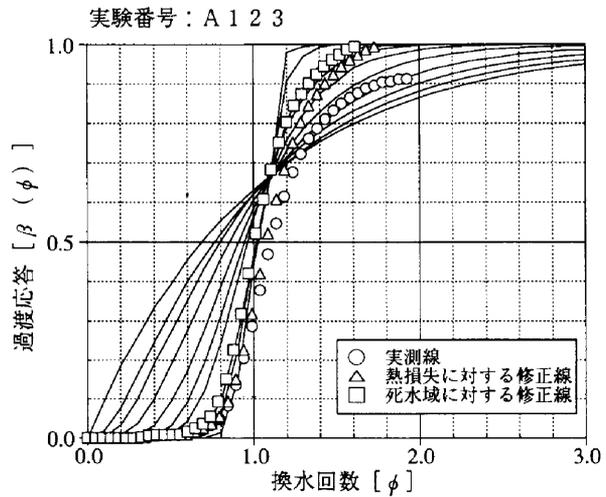


図-5 過渡応答線照合法による解析例

内側にあるため、M値の判定ができない状況となっている。この原因としては、温度成層型蓄熱槽は、流入付近での混合状態と流出付近での混合状態が異なるために、出口温度の応答が、槽の中間で変化するためと推測できる。よって、現在の過渡応答線図照合法では、温度成層型蓄熱槽の成層状況を判断するのは難しく、何らかの改良が必要である。

## § 7. おわりに

今回の実験結果から成層状況を表すパラメータの確定はまだできていないが、流速、流量、温度差、槽高さ、管径が、槽内の成層状況に何らかの影響をおよぼすことは確認された。しかし、現段階では、解析が不十分であり、今後、更に解析を進め成層状況を表すパラメータの確定を目標に検討を継続する。

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、蓄熱システム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) 建設省住宅局住宅政策課編：住宅経済データ集（1995年版）、（株）住宅産業新聞社、1995.
- 2) 経済企画庁編：国民生活白書（平成7年度版）、大蔵省印刷局、1995.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 関信弘編：蓄熱工学2 応用編、森北出版（株）、1995
- 7) 香月正司、中山 顕：熱流動の数値シミュレーション—基礎からプログラムまで—、森北出版（株）