

冷温水蓄熱槽の温度混合機構に関する研究

西岡 哲平*・太田 充彦**

Study on thermal mixture mechanism in the storage tanks

Tetsuhira NISHIOKA ・ Mitsuhiro OHTA

To clarify mixture mechanism in the thermo-cline water is very important because it has close relation with thermal efficiency of the storage tanks in buildings. We tried to clarify these of pipe-inlet and outlet type storage tanks.

From data analysis of the accurate scale-model experiments with electromagnetic flow meter following 2 points were becoming clear.

- 1) Mixture characteristics are basically determined by Ar^* discussed in 3.
- 2) Standing waves on the water surface have significant affection on thermal mixture characteristics in the water .

1. はじめに

欧米諸国に比較して電力コストが割高で、電力需要のピークカットを目的とする深夜電力料金制が採用されている我が国では、大規模業務建物のほとんど全てに建築空調熱源用の蓄熱システムが導入されており、現在これらの蓄熱システムの90%以上が冷温水蓄熱槽（以下蓄熱槽と略す）を主体とする方式を採用している。蓄熱槽については従来から、その蓄熱効率を決定する水槽内部の水温混合機構などについて既に多くの研究が行われている^{5)~10)}。又、蓄熱技術に関する学会の最近の研究発表をみると、蓄熱槽のような顕熱利用方式ではなく、氷蓄熱など潜熱利用方式の研究に重点が移った感のある事は否定できない。しかし、蓄熱槽の基本的性質に関して十分に研究し尽くされたわけではなく、理論的には熱対流の安定不安定問題や表面波動の内部温度混合機構への影響など興味深い現象について十分に解明されていない。特に熱対流の安定性に関する研究は今日のカオスの理論を始めとする非線形物理の理論的發展の原動力となった事は周知の事実であり^{3)~4)}、これらの研究成果を十分に反映させた研究をする価値は非常に高いと考える。又、実際的な設計を行う上でも、例えば最近様々な利点から一般的に採用されるようになった円形断面配管方式については内径寸法や配管ピッチ、入出力形状などの温度混合特性への影響について、十分体系的な理論化がされておらず、このため特に蓄熱槽を温度成層型として計画しようとする場合、最終的には個々の設計者の経験に基づく判断に頼らざるを得ないのが現状である。この事は蓄熱槽が今日でも依然として建築熱源設備の中核を担うシステムである事を考慮すれば、我が国の民生用エネルギーの利用効率全体に影響を与える問題であり、今後一層力を入れて研究を行う必要のある分野であると考えられる。

*建設工学科 建築学専攻 **同大学院生

2. 本研究の目的

蓄熱槽の計画手法上の問題点は設計者が温度成層型として蓄熱槽を設計する際に活用出来る具体的で詳細な技術指針が十分確立されていない事である。そこで、本研究では既に述べたように実際の蓄熱槽の様々な流路形式のうち施工性・経済性が高く、最近採用される事が多いにも拘わらず、従来の研究では基本特性が十分に明らかにされていない円形断面配管方式について、電磁流量計を使用した従来より精度の高い模型実験を行い、そのデータ分析を通して、これらの蓄熱槽内の温度混合特性に関する、より体系的な理論化を行う事を目的とする。以下、本報では、筆者らが行った様々な形式の配管方式の実験の中から、最も基本的な水平配管方式の実験及び数値解析結果を例として述べる。

3. 相似則に関する考察

密度差による浮力が重要な役割を果たす非等温流体に関する実験の相似則としてはアルキメデス数、グラスホフ数などが考えられるが、蓄熱槽の模型実験では次に述べるようなアルキメデス数（以下 Ar 数と略す）が専ら用いられる（水理学などの分野における層平均リチャードソン（overall Richardson）数に相当する）。相似則とは簡単に言えば研究対象となる現象とその縮尺模型の物理的特性の一致を保証する理論であり、従来の研究では（1）式のような配管内部直径 d_0 を代表長とする Ar_{in} が用いられてきた。実物とその縮尺模型の関係を考える場合であれば、形状は互いに相似だから代表長について特に検討する必要はないが、本実験のように配管径の異なるグループ相互の関係を明らかにするためには相似則としての Ar 数に対して、その本質に立ち返った理論的検討を加えて新たな無次元数を誘導する必要がある。従来の研究ではこの点の検討を行わずに機械的に Ar_{in} を基準とした解析のみを行っているが、本研究では4.以降に述べる実験とその解析結果から、配管径の異なる実験の槽内混合特性を特長付ける無次元として（2）式で定義される Ar^* を提案する。 Ar^* は式から判るように浮力と慣性力をその作用する面積（夫々配管断面積と槽水面面積）で積分したもので、槽本体代表長など、さらに検討を加える余地はあるが、各実験の3次元非等温乱流場の特性を非常に良く表現していると考えられる。

$$Ar_{in} = \frac{g \cdot d_0 \Delta \rho}{\rho_0 U^2} \quad \text{-----(1)}$$

$$Ar^* = \frac{\int \int g \cdot d_0 \Delta \rho dx dy}{\int \int \rho_0 U^2 dx dz} \cong \frac{g d_0 \Delta \rho L^2}{\rho_0 U^2 d_0^2} \quad \text{-----(2)}$$

- ここで、 d_0 、 L ：配管内径及び、槽本体代表長さ
- x 、 y 、 z ：水平2方向及び水深方向各距離
- U 、 g ：流入断面平均流速及び、重力加速度
- ρ_0 ：基準密度（槽内初期水の密度）
- $\Delta \rho$ ：基準密度差（流入水と槽内初期水の温度差に対応する）

4. 実験方法と実験計画

(1) 実験装置 実験装置の概要を図-1に示す。実験槽は0.8m角の透明塩ビ製立方体で、水温センサーは図-2に示す中央断面と配管周辺合計23点に配置した。温度センサーには絶縁被覆としてエナメルを薄く塗布したT(銅・コンスタンタン)熱電対を使用した。

(2) 実験手順 各実験は先ず、実験槽内の初期水温を(3)で述べる夫々の設定値に均一化し、やはり設定流量で実験槽内部水を30分~1時間循環させて、定常状態にした後、槽出入口配管の3方弁B-1~2の切替えにより、槽内の初期水温より高温の温水ステップ入力を与え、換水時間2回を目安として槽内各部水温変化を計測した。実験中は電磁流量計のデジタル表示(0.01 l/min.単位)をモニターしながら、調整弁V-1により槽入口流量を一定に保つと同時に、出口のV-2を操作して槽内水位を±1mmの範囲で一定レベルに保持した。電磁流量計の優秀な流量計測精度を十分に活かした以上のような流量調整操作により、実験中の槽内水温上昇による槽出口配管や流量制御弁の膨張に伴う流量変化を可能な限り抑制し、一定流量の維持に努めた。

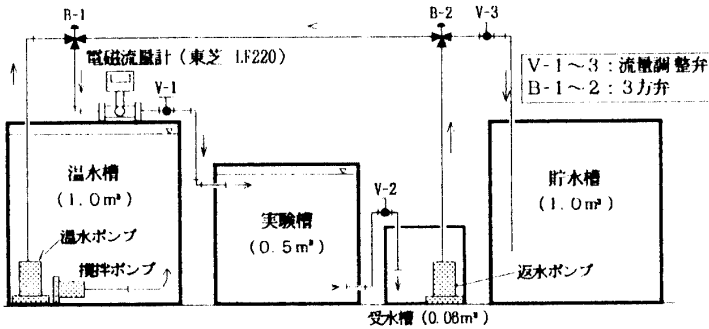


図-1 実験装置主要配管ダイアグラム

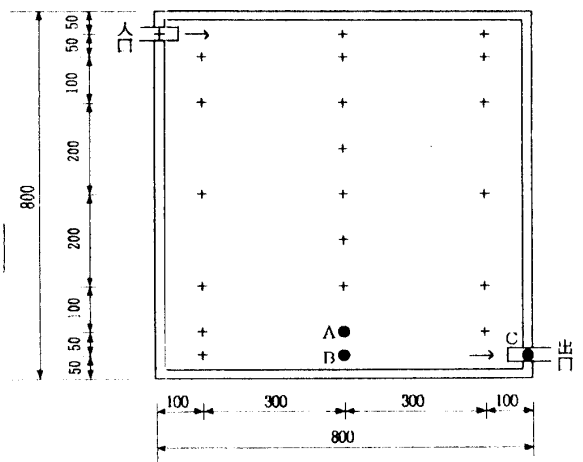


図-2 槽内温度測定点の断面図位置

(3) 各実験の設定条件 実験は25~51mmの3つの配管内径における様々な水温差、流量設定について合計84回行い、そのうち表-1に示す流量変動の小さい55回の実験データを選んで5.以降に述べる解析を行った(表中 V_w は流速を示す)。

5. 実験結果

(1) 水温応答代表値の位置 従来の模型実験の解析では、水温応答として、主に槽出口の計測値

を解析の対象としていた。本研究でも図-2のB点、C点など、槽底部や出口水温計測のためセンサー5個を設置したが、槽底部付近に形成される死水域や配管内に形成される温度成層の影響などを受ける事が判明した。これらは蓄熱システムとしてみた場合、重要な現象であるが、本研究ではこれらの複雑な乱流場の影響を除いた槽内混合特性そのものに着目した解析を行うため死水域より上方の槽底面上100mm(図-2 A点)の水温計測値を各実験の応答代表値とした。

表-1 解析対象実験の概要(全55回)

| 管径 | 最小 Δr_{10} | 最大 Δr_{10} | 実施数 |
|------|--|---|-----|
| 25mm | $\Delta r_{10}=5.94 \times 10^{-4}$ ($\Delta \theta = 5.5^\circ\text{C}$) ($V_w = 0.78\text{m/s}$) | $\Delta r_{10}=2.01 \times 10^{-2}$ ($\Delta \theta = 23.4^\circ\text{C}$) ($V_w = 0.30\text{m/s}$) | 16回 |
| 44mm | $\Delta r_{10}=1.33 \times 10^{-2}$ ($\Delta \theta = 7.1^\circ\text{C}$) ($V_w = 0.25\text{m/s}$) | $\Delta r_{10}=2.47 \times 10^{-1}$ ($\Delta \theta = 24.0^\circ\text{C}$) ($V_w = 0.12\text{m/s}$) | 26回 |
| 51mm | $\Delta r_{10}=3.69 \times 10^{-2}$ ($\Delta \theta = 4.9^\circ\text{C}$) ($V_w = 0.13\text{m/s}$) | $\Delta r_{10}=5.83 \times 10^{-1}$ ($\Delta \theta = 25.2^\circ\text{C}$) ($V_w = 0.08\text{m/s}$) | 13回 |

(2) 実験結果の概要 図-3の①～④に55回の実験の中から水温応答特性からみて典型的な4つの実験結果の概要を例として示す。図中の θ^* 及び τ は夫々槽換水時間と基準温度差(槽内の初期水温と入力水温の差)で除した無次元時間と無次元温度を表わしており、左側から順に各実験のA点における水温応答、 $\tau = 0.25$ 時及び 0.75 時の水温分布計測結果を示す。最も Λr^* の小さい①では水温分布が極めて小さく、水槽中に噴出した高温の噴流が対向壁面に衝突し、壁面に沿って高温域が下方へ沈下している事が判る。反対に Λr^* の大きな④では安定な温度成層が形成されている事が、水平で、間隔の密な等温線から判る。これらの図から何れの実験でも Λr^* が、その水温応答特性を基本的に決定している事、槽上方に形成される高温域(6で述べるR値モデルの完全混合域に対応する)が時間の経過に伴って下方へ拡大している事が判る。

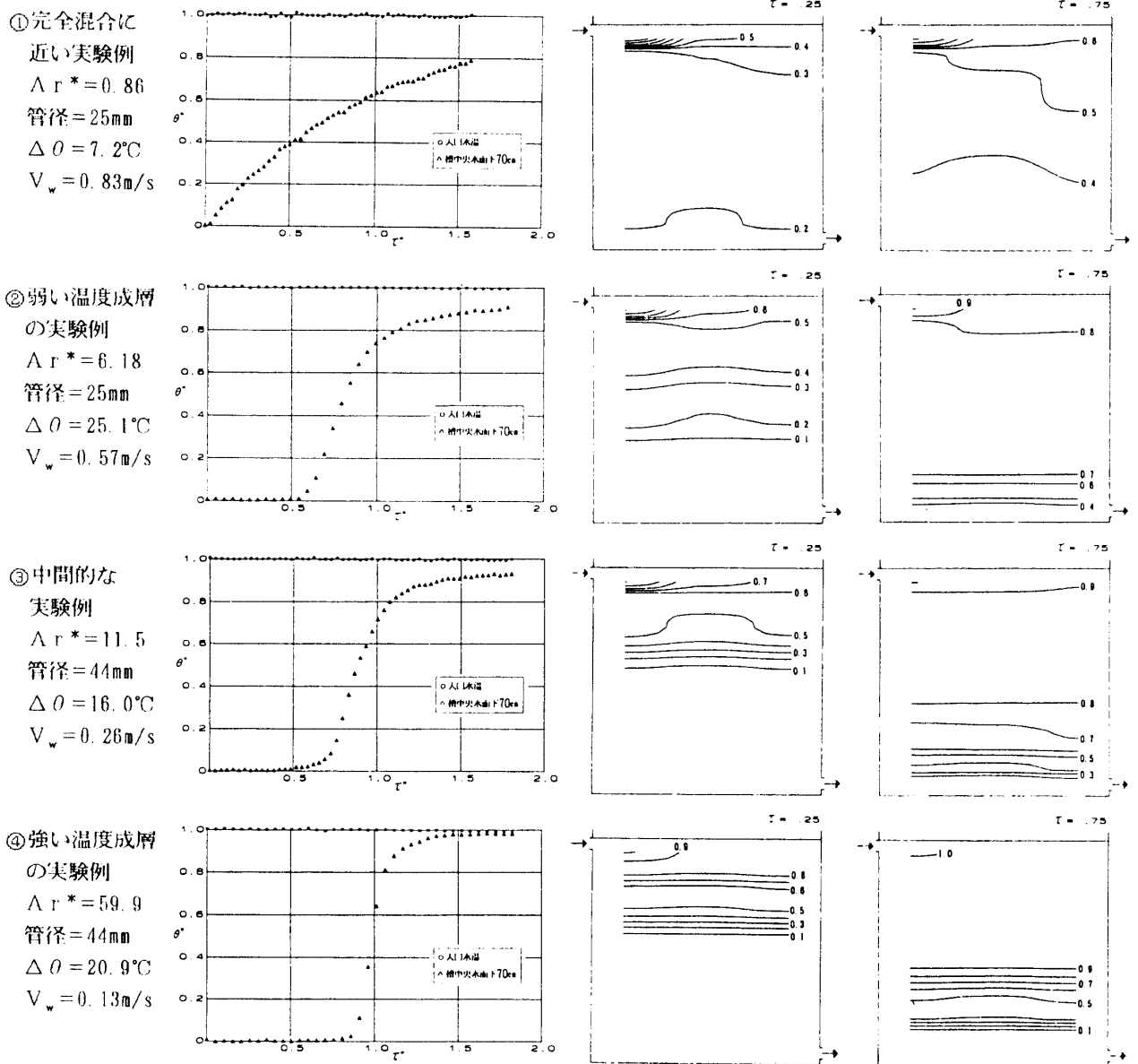


図-3 各 Λr^* レベルにおける水温応答と槽内水温分布計測例

(3) 各実験の水温応答特性の数値化 次の①～②に示す2つの無次元数を各実験の水温応答特性を表わす指標として、以下のよりに各実験データを分析する。

①槽1回換水時水温上昇 θ_1 この数値は時定数に対応する無次元水温応答で、理論的には完全混合時0.63、完全成層時0.5である。

図-4はR値モデル(6.式(4)～(6)参照)による水温応答数値計算例で、Rは槽上部の噴流によって形成される完全混合域深さ L_M の槽水深Lに対する比率を示す。この図から槽上方に水温の完全混合域 L_M が形成され、 L_M が一定値であれば(Rの時間変化率 $R_k=0$)、 θ_1 は L_M の大きさによらず0.63になる事が判る(R_k については式(3)参照)。これらの計算では、乱流拡散係数 K_1 は全て0としている。

②水温上昇0.5時経過時間 τ_c この値は $\theta^*=0.5$ を2次側利用水温差 10°C 時の利用限界水温と考えた場合、蓄熱槽の容積効率に対応する値である。図-4から完全混合状態($R=1.0$)で、最小値0.69となり、Rの減少に伴い、 τ_c は増加してゆく事が判る。

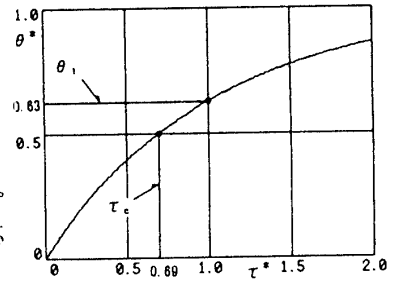
(3) 水温応答実験結果との比較 図-3に示した4つの実験例のうち θ_1 が0.63に近い値を示すのは①のみで、②～③では0.7～0.75と大きく、④では0.6より小さい。よって、図-4のような単純なモデルの数値計算結果とは一致しない事が判る。図-5は、やはりR値モデルによる計算結果で、 R_k と乱流拡散係数 K_1 の θ_1 に対する影響を示す。これらから、 K_1 の θ_1 に対する影響は R_0 が小さい場合に限られ、図-3の各実験の θ_1 が0.63と異なる値をとる原因は②～③については、主に $R_k(>0)$ の影響、④においては $R_k(<0)$ と K_1 両方の影響が考えられる事が判る。

(4) Ar数と θ_1 、 τ_c の関係 次に3.で述べたAr数と各実験の θ_1 及び τ_c との関係を明らかにする。

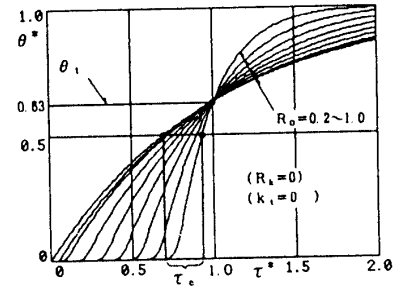
①Ar_{in}との関係 図-6に全ての実験のAr_{in}と θ_1 及び τ_c との関係を示す。何れも両者の関係については主に異なる配管径の影響で1価関数とはならない事が判る。

②Ar*との関係 Ar*と2つの特性値との関係をプロットしたものが図-7である。特定のAr*数で振動が認められるが基本的に両者ともAr*の1価関数として評価出来る事が判る。

③ θ_1 の変化の特徴 θ_1 はAr*=1以下ではほぼ0.63となるが、Ar*が大きくなるにつれて増加し、Ar*=7～8付近でピ

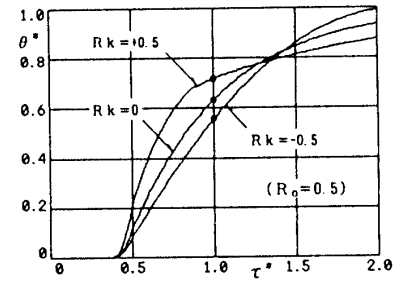


(完全混合状態の θ_1 と τ_c)

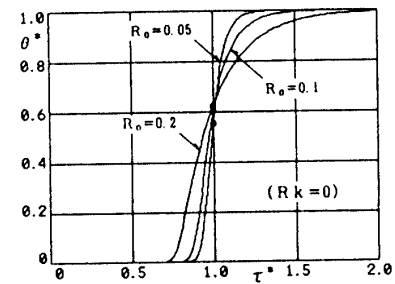


(各混合域レベルの θ_1 と τ_c)

図-4 R値モデルによる水温応答計算例



(混合域変化速度 R_k の影響)



(熱拡散の影響)

図-5 θ_1 の変動する要因 ($K_1 = 1.5 \times 10^{-7}$)

ーク値 (0.75) となった後、振動しながら100以上で0.5に減少する。又、 $\Lambda r^* = 7 \sim 40$ では Λr^* に対して1個関数とはならない領域があるが、この θ_t については6.以降で、詳しく述べる。

(5) Λr^* と蓄熱効率 η の関係 実験開始から水温上昇0.5時までの出入口水温差の積分値 η は τ_c と同様な想定条件における蓄熱槽のエネルギー効率に対応する。図-8は Λr^* とエネルギー効率 η との関係を示しており、両者には基本的な相関関係が認められるとともに、 θ_t の振動現象が η 値を特定の Λr^* 領域で劣化させている事も判る。

6. R値モデルによる数値解析結果

(1) 解析方法 各実験の水温応答特性を定量的に評価するためには、3次元非等温流体に関する運動方程式、連続の式及び、熱輸送方程式を数值的に解く必要がある。これらの基本式は浮力に関するboussinesq近似を用いて、差分法であればMAC法などによって、①差分メッシュ間隔を出来るだけ細く分割し、運動方程式の移流項に3次精度以上の風上差分スキームを用いる直接解法、②何らかの乱流の応力モデルを用いる解法、③LES (Large Eddy Simulation) などが考えられる。①②については、非定常な乱流場を扱う事には適さないという議論があり、③は極めて高度なプログラムテクニックが必要である。そこで、本報では、手頃な近似計算法としてR値モデル⁸⁾による実験データ解析を行った。このモデルでは槽内温度混合特性を決定する完全混合域比率Rについて(3)式のような線形な関係式を考えれば、重要なパラメータはRの初期値 R_0 と変化率 R_k 及び乱流拡散係数 K_t の3つである。

$$R = R_0 + R_k \cdot \tau^* \quad \text{--- (3)}$$

従来の研究では $R_k \approx 0.4$ 、 $K_t = 0$ を仮定しているが、5.でみたように、これらは実験条件によりかなり変化すると考えられる。そこで、最小自乗法

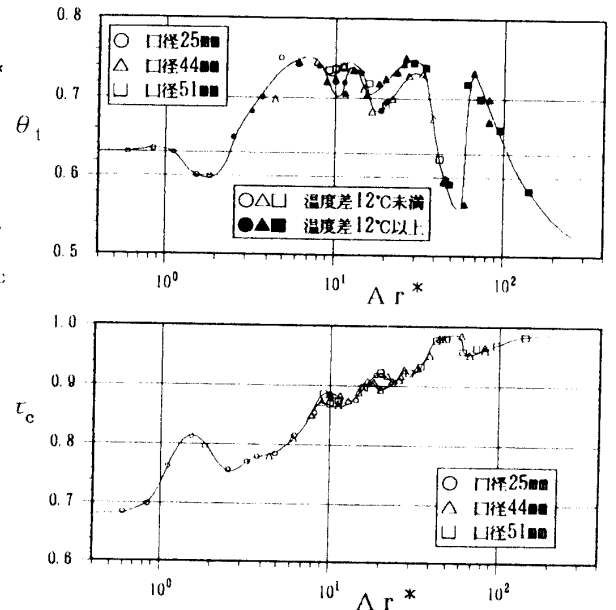


図-7 Λr^* と θ_t , τ_c の関係

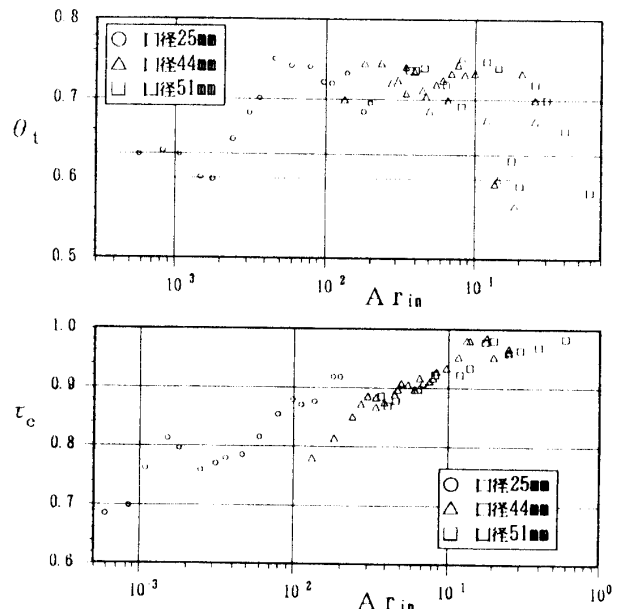


図-6 Λr_{in} と θ_t , τ_c の関係

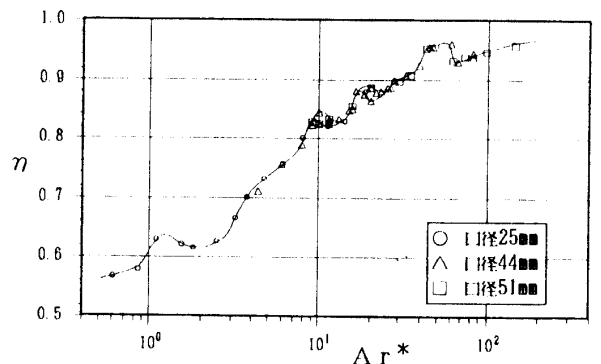


図-8 Λr^* と蓄熱効率 η の関係

により各実験結果に対応する R_o 、 R_k 、 K_t を個々に反復法で求めた。これらの数値計算には差分法を用いる事とし、完全混合域の熱収支式は(4)式に示すように1次元拡散域への熱拡散項を加え温度成層の強い実験データとの整合性を高めた。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot L_m = K \frac{\partial \theta}{\partial Z} + u_z(\theta_{in} - \theta) + u'_z \cdot \theta \quad \text{----(4)}$$

$$K = a + K_t \quad \text{---- (5)}$$

ここで、 θ 、 θ_{in} : 各部水温及び入口水温

u_z : 水深方向移流速度

u'_z : 完全混合域変化速度

a : 熱伝導係数 ($\approx 1.5 \times 10^{-1}$)

K_t : 乱流拡散係数

t 、 Z : 時間及び垂直方向深さ

又、1次元拡散域の熱輸送方程式は(6)の通りで、メッシュ間隔0.5mmとし、時間間隔は数値的な温度拡散が十分抑制されるよう配慮して設定した。又、差分スキームは全て2次精度とし、移流項は中間差分、拡散項にはDufort-Frankel差分を用いた。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} - u_z \frac{\partial \theta}{\partial Z} \quad \text{----(6)}$$

(2) 数値計算結果 各実験に対応する数値計算結果を図9~11に示す。これらで重要な点は、第1に前述の実験データから得られた結論と同様、 Ar^* がこれらの水温応答特性を決定する事である。

混合域比率 R と Ar^* との関係は図-9に示すよ

うに線形に近い単純なカーブで表わされる。又、混合域変化率 R_k は図-10から判るように前述の θ_i とほぼ一致する変化をしている。図-11は各実験結果に対応する乱流拡散係数 K_t を示しており、完全混合に近い状態で 2.0×10^{-6} 程度 (熱伝導係数 a のほぼ10倍)、温度成層状態で 1.5×10^{-1} 程度 (熱伝導係数とほぼ同程度) になる事が判る。 K_t が温度成層の基本的な安定性と関係があると考えれば、図-10の混合域変化率 R_k は次に述べる波動などの影響がなければ、点線で示すような変化をするものと考えられる。

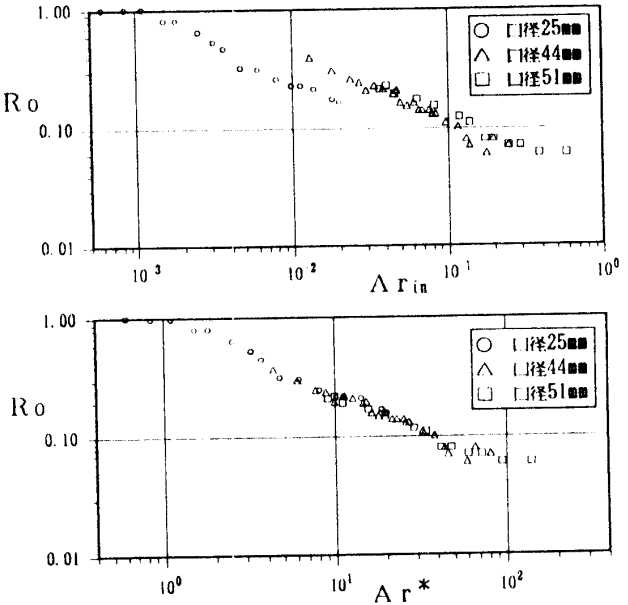


図-9 2つの Ar 数と混合域比率 R_o

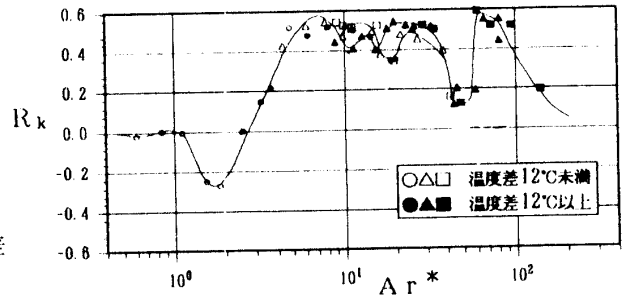


図-10 Ar^* と混合域変化率 R_k

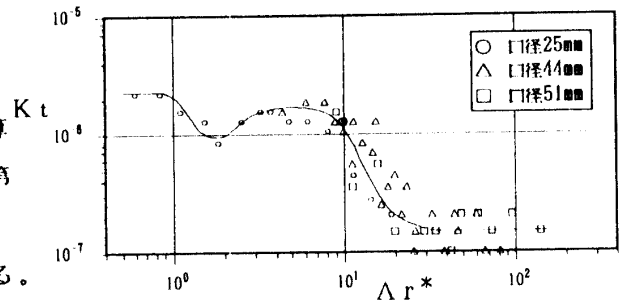


図-11 Ar^* と乱流拡散係数 K_t [m^2/s]

7. 特定 Ar^* 域における各特性の振動について

(1) $Ar^* = 70$ 付近の急激な振動

5.以降で述べたこの Ar^* 域の θ_k 、 R_k などの急激なピークは以下の考察から、水槽の表面定在波と内部重力波との共振による温度成層の攪乱によるもの考えられる。表面の定在波のうち、最大振幅の振動数は槽本体寸法から約 1 Hz と推定される。一方、温度成層が形成された内部水の浮力振動数（バイサラ振動数） N_b は (7) 式で表わされ、温度勾配を各実験の $\Delta\rho/L_M$ で近似すれば $Ar^* = 70$ 付近の各実験の N_b が、これとほぼ等しい事が判る。

$$N_b = \sqrt{\frac{-g \cdot \partial\rho}{\rho_0 \partial Z}} \quad \text{----(7)}$$

(2) $Ar^* = 7 \sim 40$ の振動

この Ar^* 域ではやや振幅の小さい2つのピークを持つ振動が認められる。これらの振動は (1) と同様の考察から非線形な強制振動にみられる分数調波の関係する現象と考えられるが、これらについては今後の検討課題としたい。

(3) まとめ 以上は従来、余り考慮されていない現象であるが、特に水槽平面形アスペクト比が整数の場合、広い Ar^* 域で影響する事も予想され、蓄熱効率への影響などについて詳細な検討が必要であろう。

<参考文献>

- 1) 江守一郎：模型実験の理論と応用（第2版）技報堂出版，1985年
- 2) 玉井信行：密度流の水理，技報堂出版，1992年
- 3) 池田駿介編：流体の非線形現象，朝倉書店，1992年
- 4) 沢田康次：非平衡系の秩序と乱れ，朝倉書店，1993年
- 5) 中島康孝：蓄熱槽の熱的重みに関する研究（その1～2）建築学会論文報告集，第199～200，1972年
- 6) 相良和伸他：蓄熱槽の数値シミュレーションに関する研究，建築学会講演梗概集，1979年
- 7) 松平秀雄他：L字形連通管式蓄熱槽の性能に関する一考察，空調学会学術論文集，1980年
- 8) 相良他：蓄熱槽に関する研究（第1報），空調衛生工学会論文集 No. 16，1981年
- 9) 小川俊平他：温度成層型蓄熱槽の熱的性能に関する実験的研究（吹出吸入口の位置関係が性能に及ぼす影響について），日本建築学会講演梗概集，1985年
- 10) 中原信生他：温度成層型蓄熱槽における各種入出力形状・位置の蓄熱特性に与える影響，空調学会論文集 No. 41，1989年
- 11) 西岡哲平他：円形断面配管温度成層型蓄熱槽に関する研究（その1）水平直管方式の模型実験と数値解析，空調学会学術講演論文集，1994年

(平成6年12月17日受理)