

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

辻	本	誠*1
相	良	伸*2
中	原	信生*3

成層型蓄熱槽で、槽の形状と入力条件が与えられれば、あらかじめ槽の熱特性を予測できる手法を得ることを目的に、模型実験を行った。実験槽の単位長さは 0.8 m で、アルキメデス数による相似則で実際の槽での条件に合わせ、入力流量・温度差のほか、出入口管径・槽辺長を変化させてその影響を実験した。

槽内の混合機構を完全混合域、深さ方向への分子拡散レベルの一次元拡散域、出口下端より下の死水域、の三つに分けて考える混合モデルを提案し、その計算値と実験結果を照合し、成層型入力の単一槽に限定される実験範囲で、入力条件によって決まるアルキメデス数 Ar_{in} と、完全混合域の深さ l の間に、 $Ar_{in}(l/d_0)^2=0.41$ (ただし、 d_0 は入口管径) の関係を得た。

はじめに

蓄熱槽は日本特有のシステムとして、1938年に東日会館に初めて設備され¹⁾、1952年以降は柳町によって一般に普及された²⁾とされていて、設備機器の容量を減ずることのできる経済性と、高効率運転や夜間電力の利用、電力ピークのソフトなど、エネルギーの有効利用に寄与し得るシステムとして広く採用されてきた。しかし、その設計法・設計データが必ずしも確立されているとは言えず、したがって上記のメリットを十分に生かしきれないシステムも現実に数多く存在するようである。特に実用面において、設計上必要な効率の求め方や温度分布の変化を予測する手法が不明確であること、また断熱・防水工法の決定版とみなし得るものがないこと、さらにはシステム側の特性(変流量・変温特性)とこれに対応する蓄熱槽の特性を実用上十分にシミュレートしきれないなどの点で、不本意な評価の低下を招きかねない。これに対し、設計法を明確にし、より有効な蓄熱槽の利用

を図ることが必要不可欠であるとして、東京電力(株)から受託した“蓄熱システム研究委員会”が、空気調和・衛生工学会に設けられ、昭和54年度から活動している。

筆者らの研究室ではこの委員会と連携して、“蓄熱槽の模型実験”および“蓄熱槽の熱特性を求めするための数値計算の研究”を行っているが、本論では成層型の蓄熱槽の熱特性を求めするための実験結果について報告する。

1. 研究の目的

蓄熱槽の熱特性に関する既出の理論としては、中島³⁾による槽内の流れを一次元拡散に見立て、混合拡散係数によって定まる M 値と、有効容積率 P 値を用いて出口応答を解析する手法や、松平ら⁴⁾による完全混合流れ・押し出し流れ・死水域の組合せで応答を解析する手法などがあるが、いずれも槽内をブラックボックス化しており、槽内の混合機構には触れていない。このため、入力条件とそれぞれの特性値との関係が明確でなく、上述の手法では、任意の条件(形状・流量・温度差)の槽についてその熱特性を導くことはできない。これに対して、中原ら⁵⁾は模型実験による解析を行い、また中原⁶⁾は実

*1,*3 名古屋大学工学部建築学科 正会員

*2 三重大学工学部建築学科 正会員

表-1 入力条件（流量・温度差）と実験番号

流量 [l/min]	温度差 [°C]			
	5	10	15	25
8	1	2	3	4
16	5	6	7	8
32	9	10	11	12
64	13	14	15	16

注 表内の番号は実験番号の最後の数字を示す。例えば実験番号 A-1-3 は A-1 シリーズの実験で、入力流量 8 l/min, 入力温度差 15°C を表す。

測結果に基づいた多槽連結型蓄熱槽の温度プロフィールから蓄熱効率を推定する方法を提案しているが、いずれも槽内の混合機構には触れておらず、その適用範囲に限界がある。

そこで、設計段階で槽の形状と入力条件から槽の熱特性をあらかじめ予測する方法を得ることを研究の目的とし、本報では限定された範囲で、成層型単一槽での混合機構を明らかにした。また、槽の形状、入口・出口の位置関係・形状など、流れに影響を及ぼす因子のすべてについて実験データをそろえることは困難なので、数値解析によって流れの性質を明らかにすることを目的とした研究（第2報）も並行して行っている。今後、実験データの充実と合わせて、汎用モデルの作成を考えている。

本報では、成層型入力に関する結果だけを扱っているが、これは、成層型入力であっても、入口条件によって成層化する場合から完全混合状態となる場合まで変わり得る現象の解析が重要であると考えたことと、解析結果として、閉空間における強制対流の問題としてとらえても興味ある結果が得られたことによる。

2. 相似則

模型実験によって事象を解析しようとする場合、事象を左右する無次元数の抽出が重要である。浮力を外力の項とした運動方程式と熱拡散方程式を無次元化すると、各項の係数を比較して、幾つかの無次元数が得られる。これらはレイノルズ数 (Re 数)、アルキメデス数 (Ar 数)、乱れの性質によって定まる数（例えば渦動粘性係数・渦温度拡散係数を含む項）であり、このうち乱れの性質自身は、境界条件が等しければ Ar 数、 Re 数によって定まると考えられるから、 Ar 数、 Re 数が流れを規定すると判断できる。本論では、二次元成層型蓄熱槽での実験⁷⁾、室内空気分布の実験⁹⁾などで結果として Ar 数が流れを規定している経験的事実に習い、本論で扱う流れの Re 数の範囲では、 Ar 数が流れの性質を規定するという立場をとり、以下の理論を進める。

ここで、本論で用いる Ar 数、無次元温度、無次元時

間の定義を示す。なお、対象とする範囲で水の密度差は温度差に比例しないため、 Ar 数の $\Delta\rho/\rho$ の項に“体膨張率×温度差”の表現は採らない。また、 $\Delta\rho$ は入力位置から判断して、成層型入力（上部温水入力、下部冷水入力）のときは正、混合型入力（上部冷水入力、下部温水入力）のときは負の値をとることとし、 Ar 数の正負で槽の性質を表現できるように考慮する。

- 1) 入口でのアルキメデス数 $Ar_{in} = d_0 g (\Delta\rho/\rho_0) / u^2$
ここに、

d_0 : 入口管直径

g : 重力加速度

u : 入口流速

ρ_0 : 初期水温での水の密度

$\Delta\rho$: 入力水温と初期水温との密度差

- 2) 無次元温度 $\theta^* = (\theta - \theta_0) / (\theta_{in} - \theta_0)$

ここに、

θ_0 : 槽内初期水温

θ_{in} : 入力水温

θ : 実水温

- 3) 無次元時間 $t^* = t/t_0$

ここに、

t_0 : 槽の換水時間

t : 実時間

3. 実験

3.1 実験条件

実際の蓄熱槽の運転条件に Ar 数による相似則を適用し、実験に用いる水槽のスケールでの実験条件を以下のように決めた。

実験水槽は、槽内の流れの可視化と出入口条件の変更が容易なようにアクリル製とした。そのため水圧の条件から深さは 0.8 m が限界になり、0.8 m を槽の基本単位 (0.8 m × 0.8 m × 0.8 mH) とした。また、温度差（密度差）は実際の蓄熱槽での条件に等しいとすれば、相似則から流入流速 u 、代表長さ l 、換水時間 t_0 の間に以下の式が成立する。

$$u_m/u_r = \sqrt{l_m/l_r}$$

$$t_{0m}/t_{0r} = \frac{l_m/u_m}{l_r/u_r} = \sqrt{l_m/l_r}$$

ただし、添え字 m, r はそれぞれ模型、実物を示す。

この関係から、実験の対象とする槽として以下のことを想定し、基本的な実験条件を表-1のように定めた。

- 1) 成層型の単一槽の場合、1辺 12 m ($l_m/l_r = 1/15$) で換水時間 6 時間程度
- 2) 連続槽のうちの 1 槽の場合、1辺 4 m ($l_m/l_r = 1/5$) で換水時間 20 分程度

流量と温度差以外には、出入口管径 ($\phi 45$: A-1 シリーズ, $\phi 70$: A-3 シリーズ, $\phi 20$: A-4 シリーズ), 流入方向への槽辺長 (A-5 シリーズで 1.6 m) を変化させて実験した。また, 相似則のところで仮定したように Ar 数によって槽内温度分布が決定することを確認するため, Ar 数をそろえた実験 (A-2 シリーズ) も行った。以上の各実験の条件を表-2にまとめた。

3.2 実験装置

図-1に装置の概要, 図-2にアクリルのユニット槽の構造, 図-3に C-C 熱電対を用いた温度測定点を示す。入力水量は図-1のHの親子浮き子式流量計で測定し, 校正は冷水槽の水深変化をストップウォッチで測定して行った。実験装置の特長および留意点は以下のとおりである。

- 1) 流量調整が水頭差による場合, 実験開始と同時に流入を開始する実験方法では, 流出側の流量が安定するまでかなりの時間がかかり, 応答に誤差を生じると考えられるため, これを除く目的で実験開始までは槽内と同温の水を入力流量と同じだけ循環させておき, コックの同時切替えて温度のみをステップ入力できる回路とした。
- 2) 入出力流量を安定させるため, 高架水槽・実験水槽・補助槽相互の水頭差と, 配管途中の弁の開度で水量を調節した。
- 3) 温度測定用 C-C 熱電対を通した測定棒 (外径 15 mm) が流れに及ぼす影響を知るため, 測定棒を中央1点 (E点), 流入口直後の点 (B点) を除く8点, 全9点を入れた場合の3ケースでそれぞれ温度分布を比較し, 流量が多い場合にもB点を外せば温度分布に変化がないことを確認した。そこで, 流量が少なく (8 l/min 以下) B点に測定棒を置いた影響が見られない条件の実験を除いて, 8点の垂直温度分布測定を基本とした。
- 4) 可視化実験以外では, 40 mm 厚の発泡スチロールで槽を覆い, 放熱による影響を除いた。実験中, アクリル板とスチロールの間に熱流計を設置し, 通過熱量を測定した。この値と計算値とから最初に非常伝導でアクリル板に吸収される熱量は, ステップ入力から2分間程度で入力熱量の1%程度, 定常状態に近づくと壁面からの通過熱は0.2%程度であることを確認した。

3.3 測定結果

- (1) アルキメデス数と槽内温度分布

表-2の実験 A-1, A-2 シリーズの条件から, Ar 数がほぼ等しい条件のものを選んで槽内の温度分布

表-2 実験条件

実験番号	槽数 [ユニット]	管径 [mm]	初期水温 [°C]	入力水温 [°C]	流量 [l/min]	入口での Ar_{in}
A-1-1	1	45	19.8	25.6	7.6	9.54×10^{-2}
1-2	1	45	19.6	29.0	7.8	1.56×10^{-1}
1-3	1	45	19.9	34.8	8.0	2.59×10^{-1}
1-4	1	45	19.9	44.5	7.9	5.64×10^{-1}
1-5	1	45	19.9	25.4	16.0	2.00×10^{-2}
1-6	1	45	21.0	31.3	15.8	4.42×10^{-2}
1-7	1	45	21.0	35.8	16.0	6.69×10^{-2}
1-8	1	45	21.0	45.9	15.7	1.33×10^{-1}
1-9	1	45	20.8	26.2	31.5	5.30×10^{-3}
1-10	1	45	20.4	31.3	32.2	1.12×10^{-2}
1-11	1	45	20.5	35.4	31.1	1.75×10^{-2}
1-12	1	45	21.2	46.2	31.0	3.45×10^{-2}
1-13	1	45	20.1	25.4	64.1	1.22×10^{-3}
1-14	1	45	19.7	30.5	64.0	2.72×10^{-3}
1-15	1	45	20.1	35.3	64.1	4.17×10^{-3}
1-16	1	45	19.9	44.3	63.8	7.61×10^{-3}
A-2-1	1	45	20.3	25.5	9.2	5.82×10^{-2}
2-2	1	45	19.6	30.4	14.2	5.49×10^{-2}
2-3	1	45	18.0	33.5	19.0	4.53×10^{-2}
2-4	1	45	17.6	42.2	24.9	4.72×10^{-2}
2-5	1	45	17.9	23.1	29.3	5.13×10^{-3}
2-6	1	45	17.8	28.2	44.0	5.10×10^{-3}
2-7	1	45	19.9	34.6	57.4	4.95×10^{-3}
2-8	1	45	19.3	44.0	78.4	5.02×10^{-3}
2-9	1	45	19.3	29.1	24.0	1.69×10^{-2}
2-10	1	45	19.6	44.2	37.4	2.21×10^{-2}
A-3-1	1	70	17.7	24.8	8.0	8.98×10^{-1}
3-2	1	70	18.3	28.8	8.0	1.45
3-3	1	70	18.9	34.3	8.1	2.33
3-4	1	70	18.9	43.4	8.1	4.25
3-5	1	70	20.2	25.9	16.0	1.94×10^{-1}
3-6	1	70	20.0	31.2	16.0	4.20×10^{-1}
3-7	1	70	19.4	34.0	16.1	5.62×10^{-1}
3-8	1	70	18.1	42.3	16.0	1.03
3-9	1	70	19.2	25.7	32.0	5.37×10^{-2}
3-10	1	70	19.4	31.2	32.0	1.09×10^{-1}
3-11	1	70	20.1	34.7	32.0	1.45×10^{-1}
3-12	1	70	19.6	44.0	31.8	2.76×10^{-1}
3-13	1	70	19.8	25.4	64.0	1.16×10^{-2}
3-14	1	70	20.1	30.2	63.8	2.34×10^{-2}
3-15	1	70	20.2	34.8	63.8	3.66×10^{-2}
3-16	1	70	18.7	43.0	63.8	6.65×10^{-2}
A-4-1	1	25	19.1	25.0	7.6	4.91×10^{-3}
4-2	1	25	20.0	30.0	8.2	8.12×10^{-3}
4-3	1	25	19.4	34.7	7.6	1.54×10^{-2}
4-4	1	25	19.3	42.7	7.8	2.51×10^{-2}
4-5	1	25	19.0	24.7	16.0	1.07×10^{-3}
4-6	1	25	19.1	29.6	15.7	2.27×10^{-3}
4-7	1	25	19.4	35.0	16.0	3.57×10^{-3}
4-8	1	25	19.4	43.6	15.7	6.47×10^{-3}
4-9	1	25	18.8	24.6	31.0	2.87×10^{-4}
4-10	1	25	19.2	29.7	30.6	5.98×10^{-4}
4-11	1	25	18.3	34.3	30.7	9.64×10^{-4}
4-12	1	25	18.9	44.1	30.4	1.80×10^{-3}
A-5-1	2	45	14.2	19.6	7.9	6.01×10^{-2}
5-2	2	45	14.4	24.8	7.7	1.42×10^{-1}
5-3	2	45	16.0	31.8	7.8	2.56×10^{-1}
5-4	2	45	17.8	37.4	7.7	3.74×10^{-1}
5-5	2	45	12.8	17.2	16.2	1.01×10^{-2}
5-6	2	45	12.9	22.6	15.8	2.83×10^{-2}
5-7	2	45	17.7	32.3	15.7	6.04×10^{-2}
5-8	2	45	15.1	37.8	16.0	9.48×10^{-2}
5-9	2	45	14.7	20.5	32.2	4.03×10^{-3}
5-10	2	45	12.5	23.9	32.2	8.18×10^{-3}
5-11	2	45	14.5	28.6	32.9	1.16×10^{-2}
5-12	2	45	14.6	38.4	33.0	2.34×10^{-2}
5-13	2	45	15.3	21.0	64.7	1.02×10^{-3}
5-14	2	45	15.2	24.4	64.5	1.81×10^{-3}
5-15	2	45	13.7	29.0	64.8	3.19×10^{-3}
5-16	2	45	15.0	38.0	63.3	6.15×10^{-3}

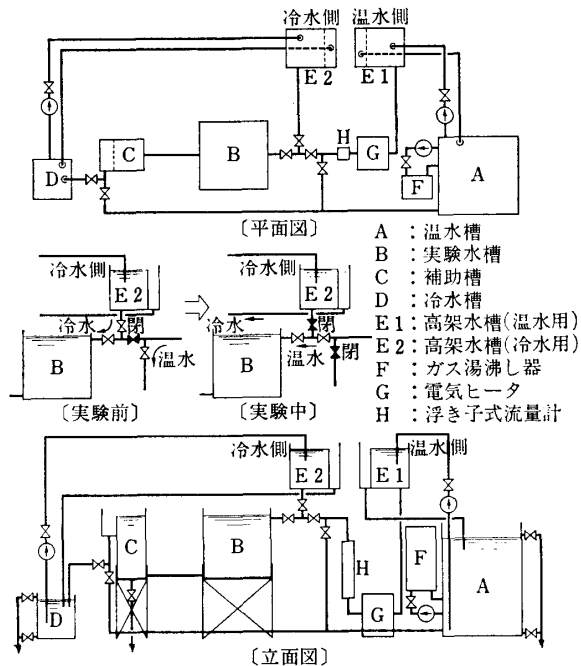
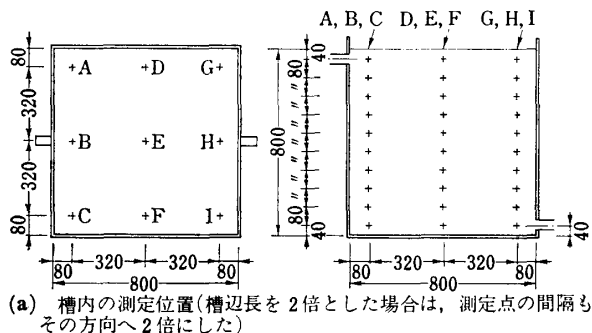
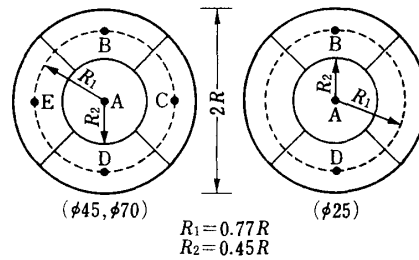


図-1 実験装置の概要



(a) 槽内の測定位置(槽辺長を2倍とした場合は、測定点の間隔もその方向へ2倍にした)



(b) 出入口での測定位置

図-3 温度測定点の位置

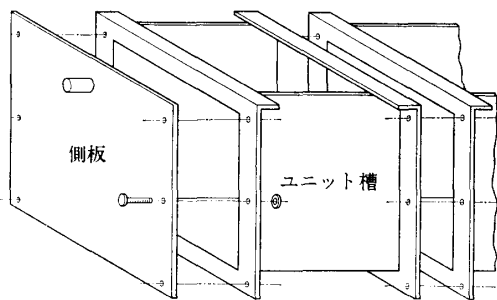


図-2 アクリル製実験槽

を比較する。図-4は槽内中央2点のステップ応答、図-5は槽出口上部のステップ応答である。この結果から、同一槽(幾何学的条件が一定)では Ar 数が一致 ($\Delta\rho/u^2$ の値が等しい) すれば、槽内および槽出口でのステップ応答が等しくなることがわかる。このことは、“2.相似則”での仮定を満足する。

図-6に、 Ar 数が等しいグループからそれぞれ1実験を選び、垂直温度分布の時間変化を示した。実線は槽中央(E点)、破線は入口の影響が直接及ばないと考えられるA点の分布を示す。さらに槽全体の温度分布の特長を知るため、 $Pr^* \approx 0.5$ (図-6の太線)での等温線による温度分布を求めてみた。図-7が $Ar_{in} \approx 2.0 \times 10^{-2}$ (実験番号A-2-10)のもので、 $Ar_{in} \approx 5.0 \times 10^{-2}$ のグループとは明確な差異が認められなかったので、比較のため Ar 数のずっと大きい実験 ($Ar_{in} \approx 5.0 \times 10^{-1}$)について、同形式のものを図-8に示した。

これらの図から、 Ar 数が大きいと温水と冷水の界面

部分での温度こう配 ($d\theta/dz$) が大きく、等温線も水平に密で成層化がはっきりしているが、 Ar 数の減少に伴って $d\theta/dz$ が小さくなり、入口と相対する壁(以後、単に対向壁という)のほうへ等温線が傾いて成層化が保てなくなり、ついには完全混合状態に遷移する。このとき、槽内が完全混合状態に至ると、出口応答も含めて槽内全体がほぼ均一な温度となる。一方、図-7と図-8を比較すれば、等温線間の距離の大小から成層化の度合いの強弱を知ることができる。

(2) 槽出入口径の変化と槽内温度分布

図-9~11に、出入口径 ($\phi 20, \phi 45, \phi 70$) を変化させた A-1, A-3, A-4 シリーズでの槽内温度の応答を示す。径が変わっても、 Ar 数の減少につれてはっきりした成層化が次第に弱まり、完全混合状態へと遷移する流れのパターンには変化がない。図中、各応答が判別しやすいように実線で Ar 数の最も大きい場合の応答を結び、破線で槽内全体を完全混合状態とした場合の応答を示した。図-13に、このうち管径が異なっても応答がほぼ同じと見られる例を示した。このように、同様の応答を示す流れが各径で存在すると考えられる。

(3) 槽辺長と槽内温度分布

槽各辺の比が流れに及ぼす影響を知るためには、ある辺を固定し、他の2辺の長さを変化させる必要があるが、本論では槽の構造上の理由から、流入方向の辺長を2倍にした実験(A-5シリーズ)によってその影響をみた。図-12に図-9~11と同様の図を示す。この結果から、流入方向の辺長比の変化も径の変化と同様、流れ

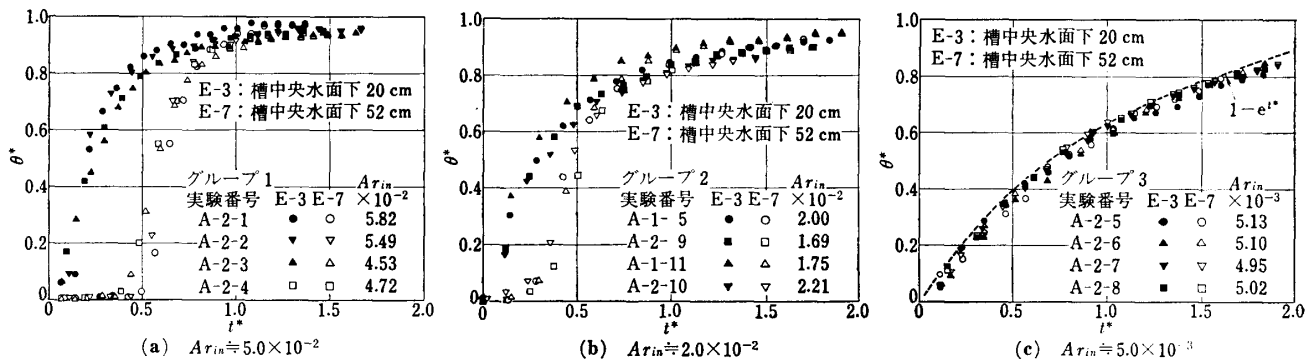


図-4 槽中央水面下 20, 52 cm のステップ応答

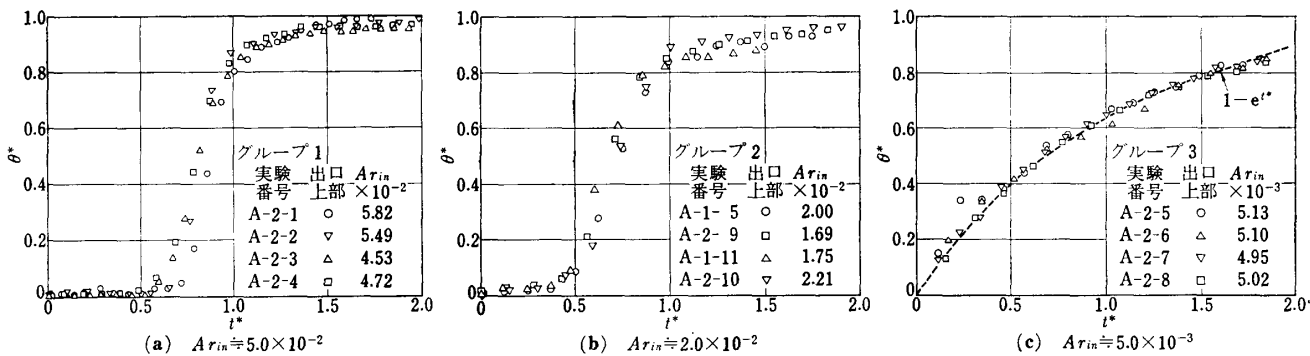


図-5 槽出口上部のステップ応答

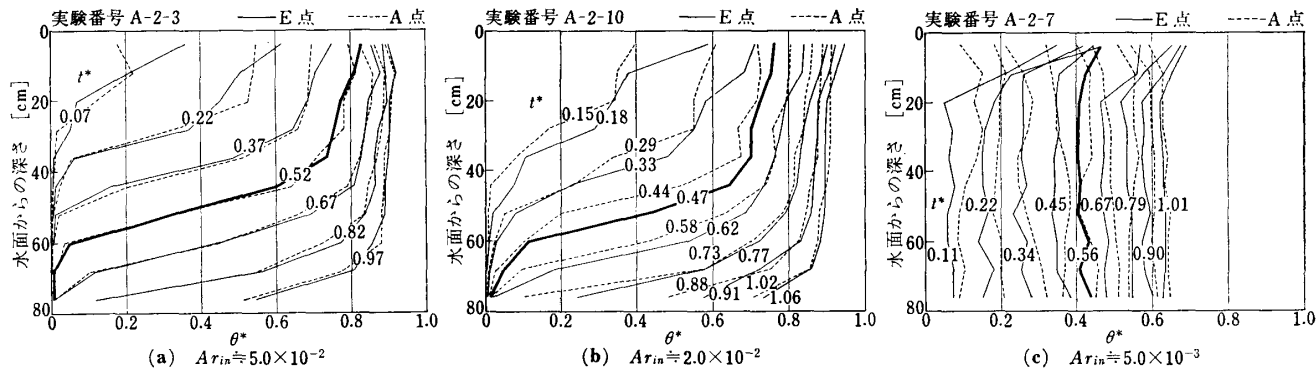


図-6 槽内垂直温度分布 (太線は $t^*=0.5$ の値を示す)

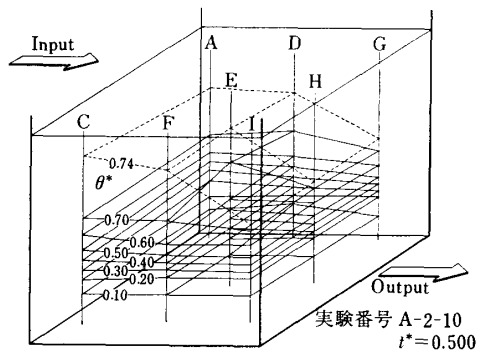


図-7 等温線による槽内温度分布 ($Ar_{in} = 2.0 \times 10^{-2}$)

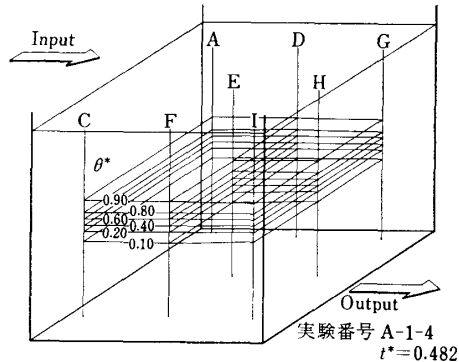


図-8 等温線による槽内温度分布 ($Ar_{in} = 5.0 \times 10^{-1}$)

のパターンには変化を及ぼさず、さらに A-1 シリーズと A-5 シリーズを比較すると、 Ar_{in} の値が等しければほぼ等しい応答を示していることがわかる。すなわち、流入方向への辺長の変化は、無次元化した応答にあまり

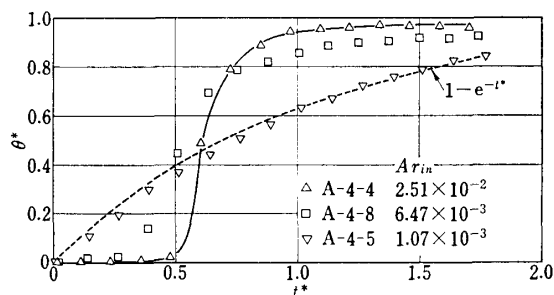


図-9 出入口管径 $\phi 20$, E-7 (槽中央水面下 52 cm) のステップ応答

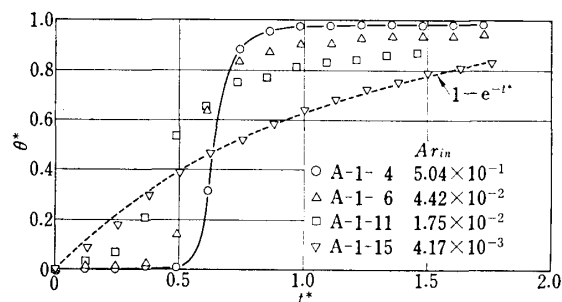


図-10 出入口管径 $\phi 45$, E-7 (槽中央水面下 52 cm) のステップ応答

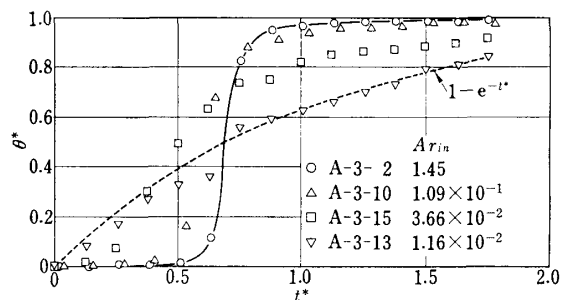


図-11 出入口管径 $\phi 70$, E-7 (槽中央水面下 52 cm) のステップ応答

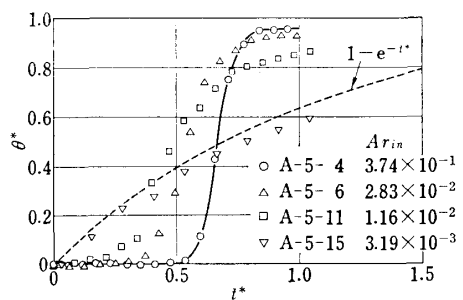


図-12 2ユニット槽, E-7 でのステップ応答 (出入口管径 $\phi 45$)

影響しない。これと同様の結果は、田中ら⁹⁾によっても報告されている。

(4) 出口管内の成層化現象

Ar 数が大きい場合、垂直温度分布の時間変化や次に述べる可視化実験での結果から、槽内の温水と冷水との間に水平な界面が形成され、この界面がゆっくり下降するのが認められる。この界面が出口の位置に達すると、出口管内で上下方向に温度分布が生じる。図-14にこの例を示す。この成層化に伴う温度こう配は、槽全体が完全混合の状態にならない限り生じ、逆に完全混合状態では全く温度こう配が生じない(図-15)。可視化の実験でも、界面が出口位置に達すると出口管内を温水(着色)と冷水が二分して流れることが確認された。この成層化のため、出口管内で下端に近づくほど応答が遅れる影響を除くため、図-5では出口応答の代表点として出口上部の値を選んでいる。

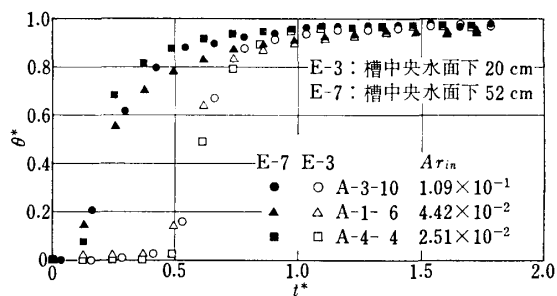


図-13 出入口管径が異なっても同様の応答が得られる例

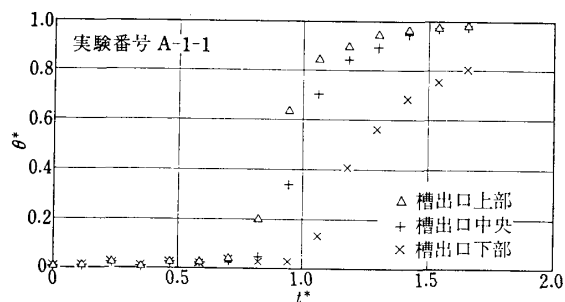


図-14 成層化した実験での出口応答の例

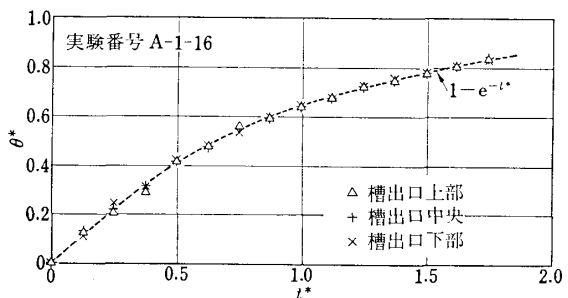
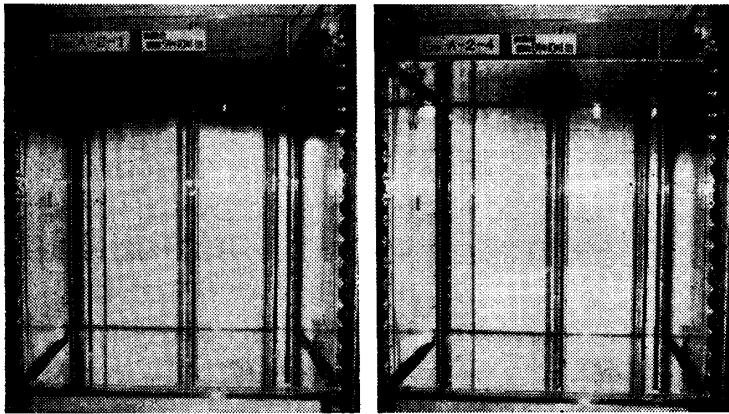


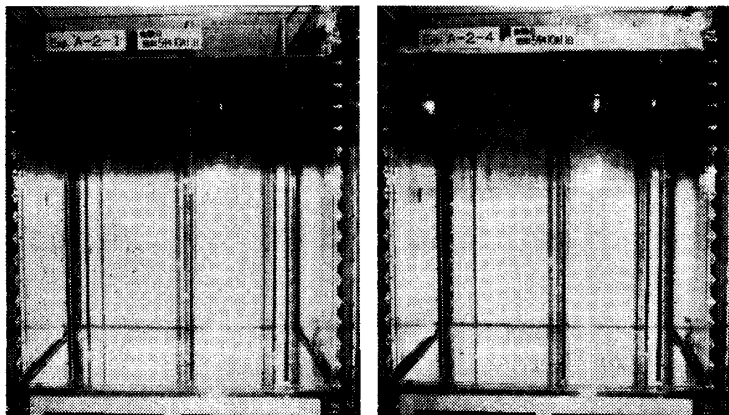
図-15 成層化の認められない実験での出口応答

実験番号 A-2-1'
($Ar_{in}=5.08 \times 10^{-2}$)

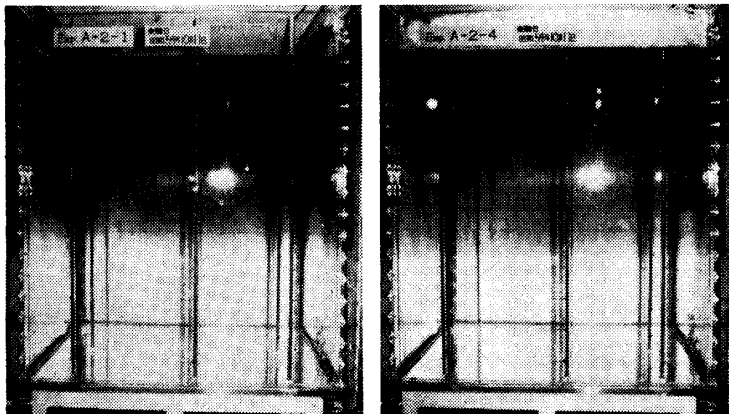
実験番号 A-2-4'
($Ar_{in}=4.72 \times 10^{-2}$)



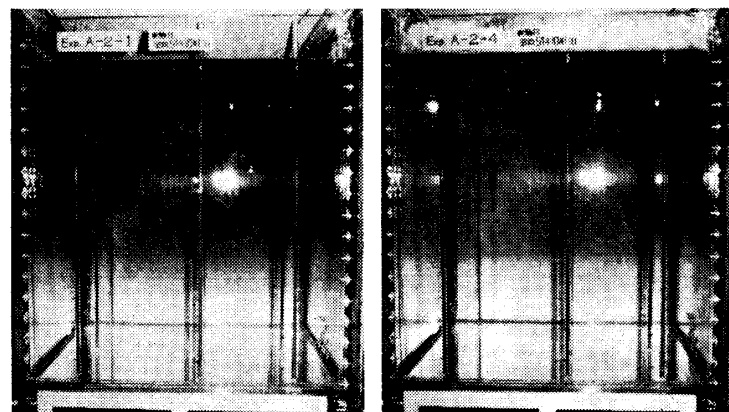
$t^*=0.063$



$t^*=0.25$



$t^*=0.50$



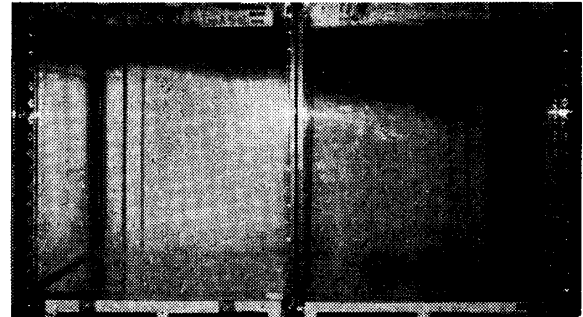
$t^*=0.75$

図-16 1ユニット槽での可視化

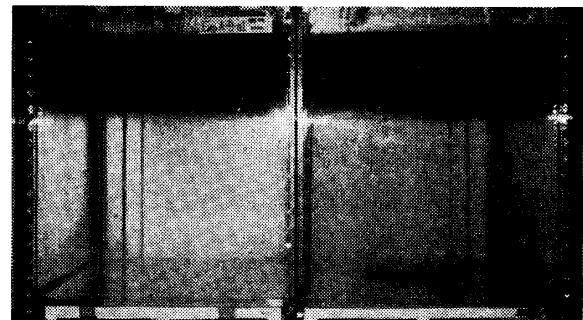
(5) 可視化の方法と結果

槽内の流れを可視化するため、流入するまでに管内で十分拡散することを確認した後、入口手前のビニルチューブから染料(ローダミンB, ウォータブルー)を混入して写真撮影を行った。図-16に、単位槽の場合で Ar 数の等しい2実験の結果、図-17に流入方向の辺長が2倍に

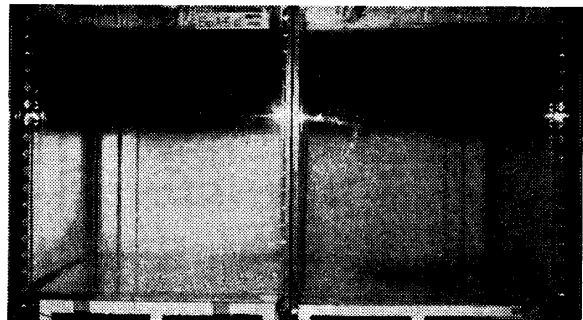
実験番号 A-5-1' ($Ar_{in}=6.01 \times 10^{-2}$)



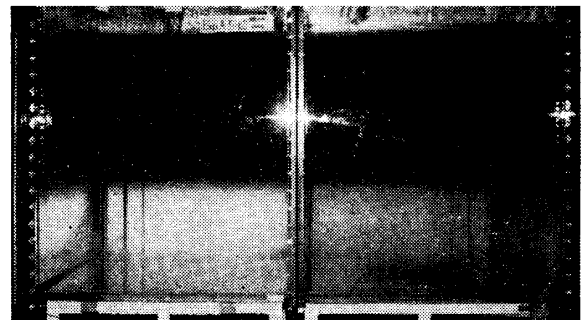
$t^*=0.031$



$t^*=0.13$



$t^*=0.25$



$t^*=0.50$

図-17 2ユニット槽での可視化

なった場合の結果を示す。流入開始直後では、温水が噴流状に拡大した後に対向壁に至るのが観察されるが、温水の持つ浮力のため等温噴流の場合のように壁面に沿って下降することはほとんどなく、水平な層が形成される。その後、この水平な層は安定した状態ではほぼ等速で下降する。そして出口管の部分に達すると、出口管内にも成層した状態で流れ込む。出口管から流出する量のために界面の下降は次第に遅くなり、最終的に出口下端より下の部分が死水域として残る。Ar 数が小さくなるに従って温度差による浮力が流れの持つ慣性力に比べて相対的に小さくなり、上述した対向壁に沿う下降流が強くなる。下降流の強さがある限界以上になると槽内全体を循環する流れが生じ、槽内は完全混合状態となる。このときは染料は槽内に均一拡散してしまうため、この種の可視化法では流れを判別できない。

図-16でAr数が等しければ界面の位置の時間変化も等しくなることがわかり、(1)で示された槽内および出口応答がAr数で定まると合わせて、Ar数が槽内の流れを決定する重要な因子であることが確認される。

4. 槽内混合機構のモデル化

4.1 実験結果に基づく槽内混合機構の分析

実験結果から得られた槽内の熱拡散に関する定性的な特長から、槽内温度分布と出口温度を予測するモデルを考える。

まず、成層化が認められる流れにおいて、実験結果から推察される熱拡散に関する定性的な特長は、以下のとおりである。

- 1) 図-7,8から、流入口の影響を受ける部分を除いて、水平方向に水温はほぼ等しい。このことから、槽内の熱拡散を深さ方向への一次元拡散で近似できると考える。一次元の乱流拡散方程式は式(1)のように表せる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - U \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \dots (1)$$

ここで、

K : 乱流拡散係数

U : z 軸方向の流れの速さ (= 流入流量 / 槽底面積)

K の値は一定でなく、流入口での条件、温度分布などによって変化する。

- 2) 垂直温度分布の時変化(図-6)を見ると、温水と冷水の界面付近の温度こう配は、時間経過に従って界面が下降してもほとんど変化しない。また、この部分の下降速度は“流入流量/槽底面積”にはほぼ等

しい。すなわち、界面の近傍では流れの乱れによる熱の拡散はほとんどなく、熱は移流(深さ方向の流れ： U)によって移動するのが主で、式(1)の K の値は小さく、分子拡散のレベルであると推測できる。

- 3) さらに図-6から、流入口の影響を直接受けない位置では、上部に温度がほとんど均一な層のあるのが認められる。すなわち、この領域では流れの乱れが大きく、式(1)で言えば K の値が非常に大きいことに該当する。

1)~3)を総合して、槽内の熱拡散は式(1)で近似的に表現され、拡散を規定する K の値は深さ方向に変化し、上部では非常に大きく、次第に減少して温水と冷水の界面近傍では分子拡散レベルになると考えられる。

以上の定性的な特長からモデルを組み立てるには、 K の値の深さ方向への減衰をどのように仮定するかが問題となる。中島の M 値による解析²⁾では出口温の応答だけを対象としているため、 K を一定とする手法をとっているが、 K 一定では図-18の計算例のように界面付近で温度こう配が一定に保たれず、図-6に示したような成層型の槽内温度分布を説明するには不適である。 K の値は、各点における $\partial \theta / \partial z$ 、乱れの強さなどによって定まると考えられるが、ここではステップ入力に対する応答を解析の対象としていることから、ある入力条件では、時間とは関係なくオーバオールな形で K の減衰の仕方が定まるとし、以下の単純な二つのモデルを比較する。

A : 図-19(a)のように、槽内は入口でのAr数で決まる長さ l の完全混合域($K=\infty$)と、その下の分子拡散レベルの一次元拡散域($K=\kappa_0$ で一定)に二分されると考える。

B : 図-19(b)のように、入力条件で決まる長さ l の間に拡散係数が分子拡散レベルの値 κ_0 の100倍の値から、 κ_0 まで直線的に減衰し、それより下の部分では $K=\kappa_0$ で一定であると考えられる。

上記A,Bのモデルについて、 l/L を0.1から0.1刻みで変化させ、E-7(深さ0.75L)に相当する位置でのステップ応答を計算したのが図-20である。図-10との比較から、Aのほうがモデルとして妥当であると判断できる。実際にはモデルAのように二つの領域ではなく、 K が $K \rightarrow \infty$ から $K=\kappa_0$ へ漸減する領域が存在すると考えられるが、この領域をモデルに加えると実験結果と照合して決まる実験定数が増え、モデルにあいまいさを付加することになるため本論では採らない。また、現象に合わせて l が時間的に漸増するモデルでは深さ l での境界条件の設定が困難でありこれも採用しない。

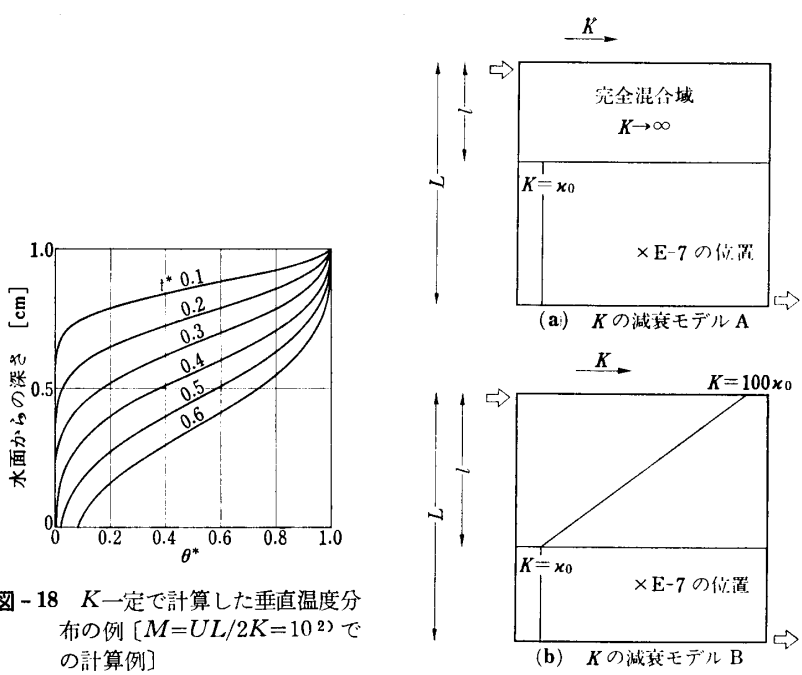


図-18 K 一定で計算した垂直温度分布の例 [$M=UL/2K=10^2$] での計算例]

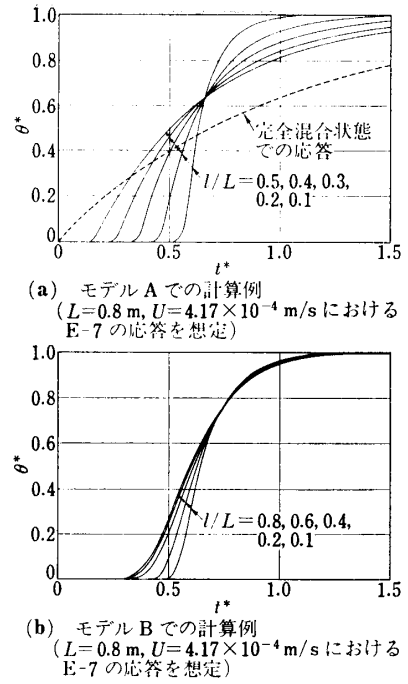


図-19

図-20

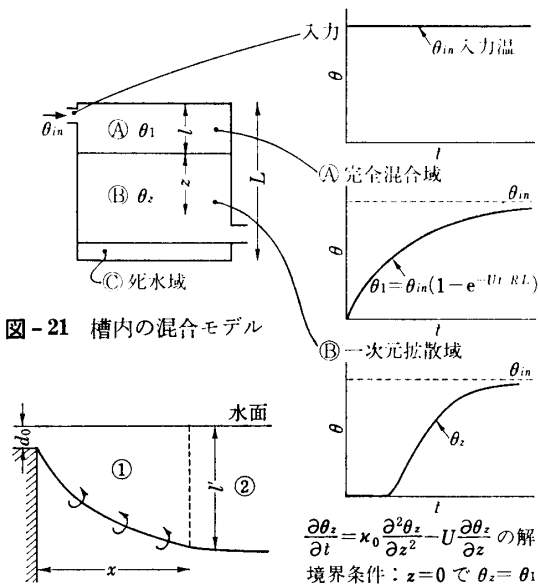


図-21 槽内の混合モデル

図-22 半無限域への密着噴流の噴出

4.2 混合モデル

上述の考察に基づき、槽内を図-21に示すように上から次の3領域に分け、槽内および出口の温度分布を予測する。

- Ⓐ：ある一定の深さ l の完全混合域
- Ⓑ：分子拡散レベルの一次元拡散域 (水平方向に等温)
- Ⓒ：出口下端より下の死水域

このモデルでは、領域 Ⓐ の深さ l が唯一の未知数であり、実験結果から入口での条件と l の関係が明らかに

表-3 混合モデルの計算条件

Ⓐ 完全混合域	深さ： $R=l/L=0.05\sim 0.50$ (0.05 刻み) 計算式： $\theta_{out}=\theta_{in}(1-e^{-UL/RL})$
Ⓑ 一次元拡散域	深さ： $L-l$ (死水域の深さ) 計算式： $\frac{\partial\theta}{\partial t}=\kappa_0\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}-U\frac{\partial\theta}{\partial z}$ を差分で数値計算 $\Delta x=L/400, \Delta t=t_0/200$ $\kappa_0=1.41\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ U =流入流量/槽底面積
Ⓒ 死水域	深さ：槽出口下端より下の部分 計算式： $\frac{\partial\theta}{\partial t}=\kappa_0\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}$ (槽底面で断熱条件)

なれば、任意の条件に対して槽内の温度分布を計算で予測できる。すなわち、 l が定まれば、図-21に示すようにまず完全混合域の温度変化が決まり、その温度変化を境界条件とし、表-3の値を用いて式(1)を数値計算することで、一次元拡散域での温度変化が求まる。

入口での条件から l が定まる機構については、以下のように考えた。

- 1) 図-22に示すように、密度噴流の半無限域への水平噴出の場合に、①等温噴流と同程度に周囲流体との間に激しい混合の生じる領域と、②速度の減衰と密度差による浮力のために混合が抑制される領域との境界を想定すると、この境界までの無次元距離 x/d_0 およびそのときの噴流の幅 l'/d_0 は、入口での Ar 数によって規定されると考えられる。すな

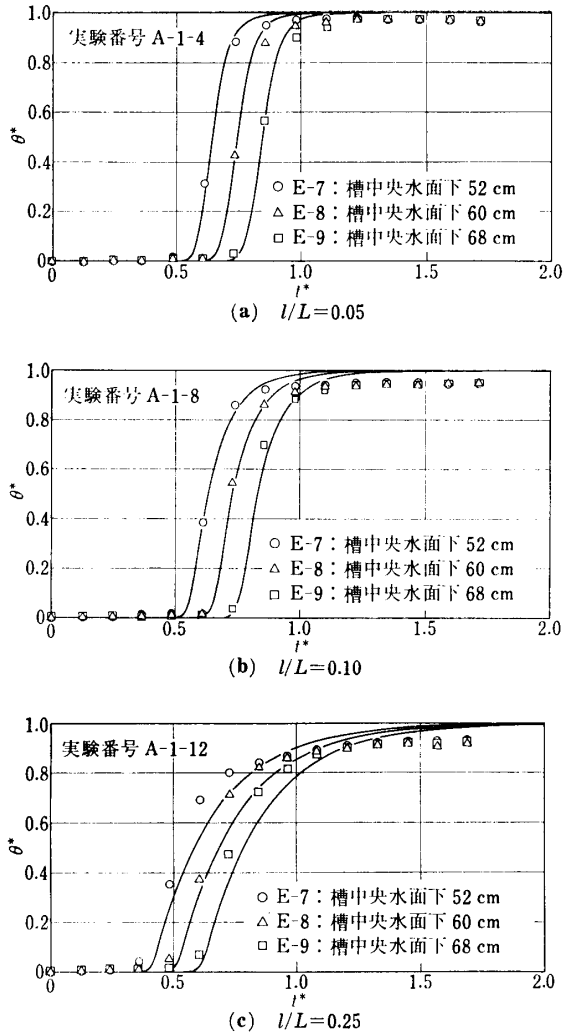


図-23 計算値と実測値の照合例

わち、流れの性質の変化する位置は l/d_0 と Ar_{in} によって規定される。

2) 一方、有限の槽内でも入口近傍の流れは 図-22 に類似し、さらに成層化が生じる流れでは対向壁による流れへの影響が小さいと仮定できれば、流れによる拡散の性質が変化する位置（オーバーオールに l で代表）は、1)と同様に Ar_{in} と l/d_0 で規定されることが考えられる。

上記 1), 2) の考え方から、入口での Ar 数と l/d_0 の関係を実験結果から求めることとする。

解析の対象である成層型蓄熱槽では、槽下部の温度分布を知ることが重要であり、また完全混合と仮定した ④領域およびこの近傍では計算値と実測値の整合性はあまり望めないから、槽中央E点で深さが $0.65L$, $0.75L$, $0.85L$ の位置 (E-7, E-8, E-9) でのステップ応答の実測値と、表-3 の条件を用いて前述の計算手法で得た計算値とを比較して、各実験での $l/L (=R)$ を求めた。この計算値と実測値との照合例を、図-23 に示す。

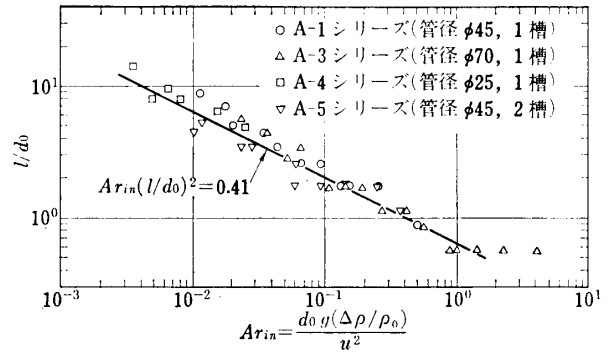


図-24 Ar_{in} と l/d_0 の関係

表-4 槽内全体が完全混合状態となる Ar_{in} と l/L

出入口管径 [mm]	実験番号	Ar_{in}	式(2)から求めた l/L
25 (A-4 シリーズ)	A-4-12	1.80×10^{-3}	0.47
45 (A-1 シリーズ)	A-1-16	7.61×10^{-3}	0.41
45 (A-5 シリーズ)	A-5-14	1.81×10^{-3}	0.85
70 (A-3 シリーズ)	A-3-13	1.16×10^{-2}	0.52

ここで、各実験で実測値と計算値を照合して求めた l/d_0 と Ar_{in} の値を両対数グラフにプロットすると (図-24), グラフ上の直線からの偏りが各シリーズでわずかに見られるが、式(2)の関係が得られる。

$$Ar_{in}(l/d_0)^2=0.41 \quad \dots\dots(2)$$

この実験式を用いて、入力条件から完全混合域の深さ l を求めることができる。

4.3 混合モデルの適用範囲

この混合モデルは成層型蓄熱槽を対象としているので、槽内が完全混合状態になる条件が適用限界となる。槽内の温度分布に注目すると、成層型から完全混合状態への遷移は Ar_{in} の減少によって生じ、完全混合状態の槽では入口近傍を除いたすべての点の温度はほぼ均一で、図-4(c), 図-5(c) のように $\theta^*=1-e^{-t^*}$ に従って変化する。

この成層化が破壊される条件について、各シリーズで完全混合状態となった実験のうち、 Ar_{in} が最大値をとるものと、この Ar_{in} 値を用いて式(2)で求めた l/L の値を表-4に示す。槽が1ユニットの場合、 $l/L \approx 0.5$ の条件で 3.3(5) で述べたように完全混合状態への遷移が起こるが、2ユニットの実験では $l/L=0.85$ に至るまで成層化が保たれる結果となっている。辺長比による影響は明らかでないが、流れ方向へ槽辺長が増すと完全混合状態へ遷移する臨界での Ar_{in} 数は減少すると考えられる。

一方、4.1で検討したようにこの混合モデルは式(1)の K が $K \rightarrow \infty$ から $K = \kappa_0$ に減衰する領域を含んでい

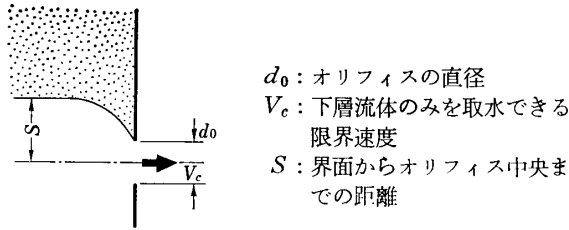


図-25 選択取水における界面の変化

d_0 : オリフィスの直径
 V_c : 下層流体のみを取水できる限界速度
 S : 界面からオリフィス中央までの距離

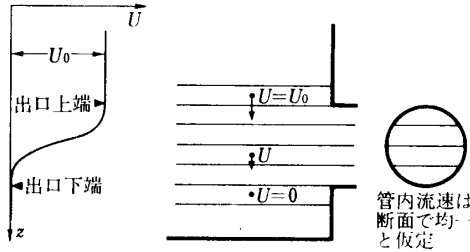


図-26 出口位置での U の減衰

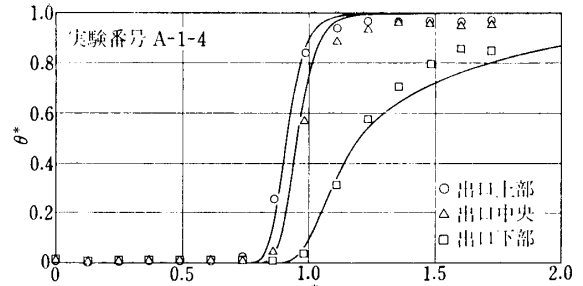
ないために、 l が温度変化を予測しようとする位置 (例えば、出口位置) の深さに近い値の場合には、計算値と実測値との整合性が失われる (図-28 の槽上部)。すなわち、 $l/L \approx 0.5$ となる条件では、計算値は槽内のごく下方の部分でしか整合性を持たないことになる。一方、図-20(a) で $l/L \geq 0.5$ での計算値を、槽全体が完全混合状態での計算値で代用しても、大きな誤差は生じない。

以上の考察から、本論の混合モデルを適用できる範囲は、入口条件と式 (1) から求められる l/L の値が 0.5 を超えない範囲であり、 $l/L > 0.5$ の条件に対しては槽内を完全混合状態としてステップ応答を求めることとした。

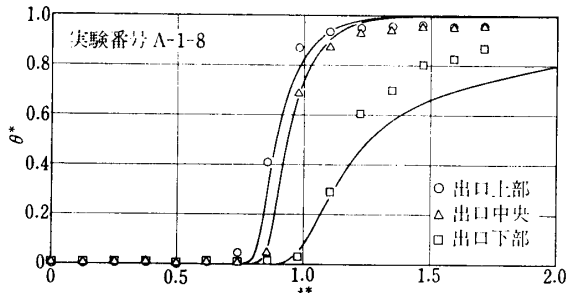
4.4 出口成層化現象のモデル化

図-14 に示すように槽内が完全混合状態でない限り、界面が出口部分に達すると出口管内には上下方向に温度分布が生じ、管内でも界面を保持したまま流出するため、界面の下降速度が減衰し、出口下部の温度上昇はかなり遅れる結果となる。この現象は、蓄熱槽の出口応答を単一の出力で表現する場合に重要であると考えられるので、界面の下降を考慮して出口での温度分布を予測できるモデルを考えた。

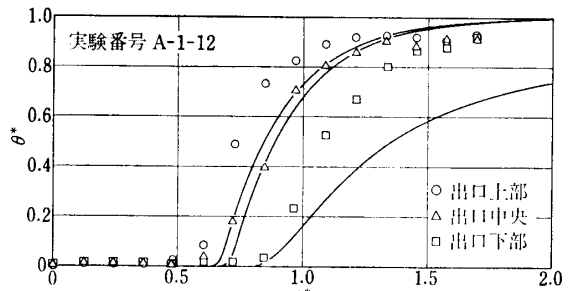
まず出口管位置での界面の下降を考える際に考慮する必要のあるのは、出口流速の影響によって出口付近の界面が引き下げられる現象である。この現象は、水理学で貯水池などからの選択取水の問題として研究されており、図-25 のような三次元オリフィスからの取水については、限界取水速度 V_c と界面の移動距離 S の間に式 (3) の関係が明らかにされている。



(a) $l/L=0.05$



(b) $l/L=0.10$



(c) $l/L=0.25$

図-27 出口3点の実測値と計算値

$$\frac{V_c}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho_0)gS}} = 3.24 \left(\frac{S}{d_0} \right)^2 \dots (3)*$$

ここに、 d_0 はオリフィスの直径である。

本実験では界面での密度差が明確でないため、 $\Delta\rho/\rho_0$ の実測値を与えることは困難であるが、式 (3) を変形すると $S \propto (\Delta\rho/\rho_0)^{-1/2}$ となり、 $\Delta\rho$ の変化は S の値にあまり影響しない。そこで、表-2 から実験 A-1-1 の条件をこのまま式 (3) に代入すると $S=0.045$ [m] となり、界面の垂下りは管径程度のオーダーで界面が全体として次第に下降することを考慮すれば、出口流速による界面の移動は無視してよいと考えられる。

そこで、出口の影響によって領域⑧の水平方向に均一な温度分布は乱されないと仮定し、式 (1) でいう降下速度 U が出口位置で管内の流速分布に従って減衰するモデルを考えた。条件を簡単にするため出口管内での流速が断面で一定であるとする、 U は図-26 のように出口上端から下端の間に U_0 から 0 に減衰する。出口位置に相当する深さでの計算条件をこの条件に置き換え、

* 玉井信行：密度流の水理, (1980), p. 193, 技報堂出版

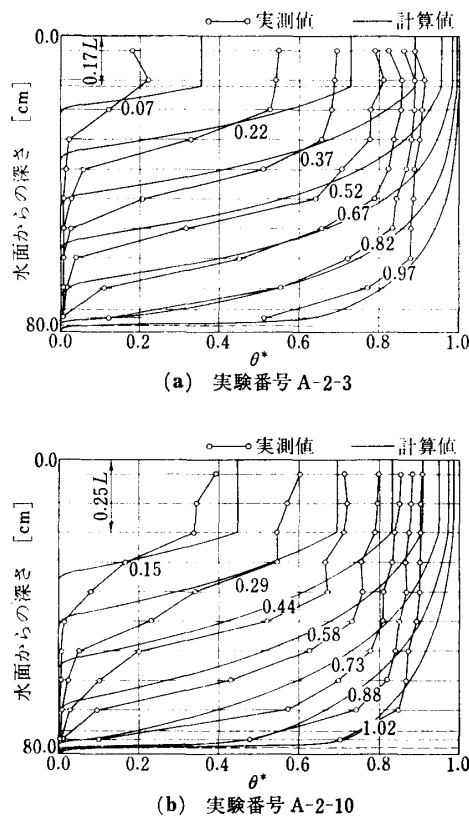


図-28 垂直温度分布の実測値と計算値

図-23 で用いた l の値をそのまま採用し、計算で求めた出口3点の温度変化と実測値を図-27で比較する。測定点の間隔がわずか 17 mm であるにもかかわらず、実測値と計算値はよく合致し、この計算法で出口での成層化した流れを表現できることがわかる。なお、4.2 で各実験の l を求めるときに用いた計算値にはこの出口モデルは考慮されていないが、出口部分で U が減衰する条件を加えても、E-7, 8, 9 の位置の計算値には変化がなく、4.2 で求めた l/d_0 と Ar_{in} の関係には影響しない。

4.5 モデルによる計算値と実測値の比較

上述の混合モデルの考え方に従って入口での Ar 数が与えられれば、槽内温度分布および出口応答を予測することができる。そこで、図-6に垂直温度分布が示されている実験 A-2-3, A-2-10 に混合モデルを適用し、計算値と実測値の比較を行う。入口での Ar 数(表-2)と式(2)の関係からそれぞれの l が求まり、槽深さに対する完全混合域の深さの比 $R(=l/L)$ は A-2-3 で 0.17, A-2-10 で 0.25 となる。この値から計算した垂直温度分布とA点での実測値を図-28, さらに出口3点についての計算値と実測値を図-29に示す。垂直温度分布では各無次元時間に対して少しずれがあるが、槽下部での温度分布の傾きはよく一致しており、混合モデルの妥当性が示される。槽出口についても時間軸でのずれ

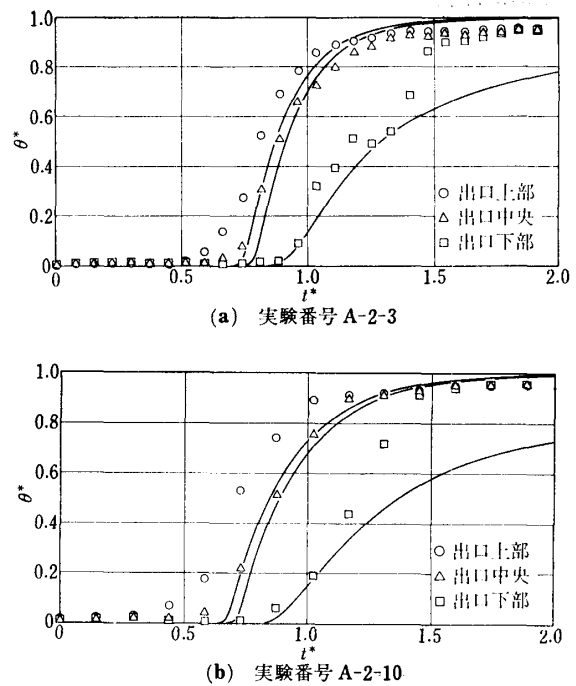


図-29 出口3点の実測値と計算値

はあるが、比較的良好に一致している。流出入量が多いほど実測値の応答が早く現れる傾向があり、4.4 で指摘した出口流量による界面降下の影響が、流量の多いときには生じていると考えられる。

おわりに

以上に述べた本論の内容を要約すると、次のようになる。

- 1) 成層型蓄熱槽を想定した基礎実験を行い、入口管径での Re 数が $2.7 \times 10^3 \leq Re \leq 6.0 \times 10^4$ の範囲で、 Ar 数が出口のステップ応答のみならず槽内温度分布を決定する因子であることを確認した。
- 2) 槽内の混合機構を完全混合域・一次元拡散域・死水域に分けてとらえ、槽の深さに対する完全混合域の深さの比 (R 値) を与えることで、槽内温度分布を計算する手法を示した。
- 3) 完全混合域の深さ l と入口での Ar 数の間には、入口管径・槽辺長の変化にかかわらず $Ar_{in}(l/d_0)^2 = 0.41$ の関係が実験的に認められ、この関係から入口での Ar 数が与えられれば R 値 ($=l/L$) が求まり、温度分布を計算することができる。
- 4) 界面が出口位置にある場合の温度分布を説明する計算手法を示した。
- 5) この混合モデルの適用範囲は、 $R \leq 0.5$ となる入口 Ar 数を与える条件であり、 $R > 0.5$ の条件でのステップ応答は槽内を完全混合状態と仮定して求め

ても、大きな誤差は生じない。

ただし、上記の結論は、行った実験の条件から適用範囲が下記の3点に限定される。

- 1) 温度はステップ入力、流量は一定の入力条件であり、初期状態で槽内温度が均一であること
- 2) 成層型蓄熱槽の単一槽を想定し、入口・出口の形状と位置が実験条件と同じ関係にあるもの
- 3) 槽下部および出口の温度応答の予測

実際の蓄熱槽のように $\Delta\theta, u$ が変化する場合には、本モデルの適用は困難であり、今後、数値シミュレーションおよび実験の結果を踏まえて考察していきたい。

なお、本論文は昭和55年度の空気調和・衛生工学会学術講演会論文集に、この内容を発表した。

実験ならびにデータ整理に際し、名古屋大学大学院生の前田茂哉君に多大な協力を得た。ここに深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本建築設備年譜, (1972), 空気調和・衛生工学会
- 2) 柳町政之助: 暖冷房装置・蓄熱運転の実際, (1965), 日本暖房機器工業会
- 3) 中島康孝: 蓄熱槽の熱的重みに関する研究(その1, その2), 日本建築学会論文報告集, 199, 200号(1972)
- 4) 松平秀雄ほか: 蓄熱水そうの蓄熱量の解析(3), 空気調和・衛生工学, 47-5(昭48-5)
- 5) 中原信生ほか: 変流量モデルによる蓄熱槽の設計法に関する研究(その3), 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, (1974)
- 6) 中原信生: 蓄熱運転の実際と運転効率の向上, 空気調和・衛生工学, 50-9(昭51-9)
- 7) 柳田耕二ほか: 温度成層流蓄熱槽の性能, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 9(1979-2)
- 8) 勝田高司ほか: 温風暖房時の室内気流の可視化, 第2回流れの可視化シンポジウム, (1974)
- 9) 田中俊六ほか: 温度成層型蓄熱槽に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, (1972)

(昭和55.9.9 原稿受付)

Studies on Heat Storage Water Tank

Part 1—Experimental Study on Mixing Process of Stratified-type Heat Storage Water Tank

by Makoto TSUJIMOTO*¹, Kazunobu SAGARA*² and Nobuo NAKAHARA*³

Synopsis: Experimental studies on a stratified-type heat storage water tank were carried out to obtain the principle which can predict thermal characteristics of the vessel for given shape and input conditions.

The unit length of the experimental vessel is 0.8 m, and input flow rate, diameter of inlet and outlet, and the length of the vessel were varied considering the real scale heat storage tank under the law of similarity using Archimedean number.

A model which explains the mixing process in the vessel is proposed. The model consists of three regions, i. e. ① perfectly mixed region at the top, ② one dimensionally diffused region at the intermediate, and ③ dead region at the bottom beneath the outlet.

From the experimental observation it is assumed

that, in ② region, thermal diffusion is of the order of molecular one in vertical direction and water temperature holds uniform in horizontal direction.

Comparing the values calculated by the proposed mixing model with experimental data, an equation which predicts the depth of ① region was obtained as follows.

$$Ar_{in}(l/d_0)^2 = 0.41$$

where,

$$Ar_{in} = \frac{(\Delta\rho/\rho_0)gd_0}{u^2}$$

l : depth of perfectly mixed region

d_0 : diameter of inlet

$\Delta\rho$: density difference of water between in-flow and initial vessel condition

ρ_0 : density of water at initial vessel condition

g : gravity acceleration

u : velocity of inflow

(Received September 9, 1980)

*¹,*³ Department of Architecture, Nagoya University, Member

*² Department of Architecture, Mie University, Member