

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４）

Development of Cascade-Type Heat Storage System (Part4)

吉田 尚弘* 佐藤 健一*
Naohiro Yoshida Ken-ichi Sato
城田 修司*
Shuji Shiota

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。

本報では、カスケード型蓄熱の基本要素である温度成層現象を支配していると思われる熱拡散現象および流入出水による攪拌現象を把握し、定量化を試みる。また、現状のシステム運転に則した蓄熱、放熱の反復運転を行いシステム性能を検証する。最後にシステム性能の評価指標である有効温度域形成率の推定手法について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 熱拡散および攪拌現象の把握
- § 3. 蓄放熱反復運転下における槽内特性
- § 4. 有効温度域形成率推定法の検討
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

既往の研究成果からカスケード型蓄熱の基本要素である温度成層形成に対する影響因子を抽出し整理した。また、異なる温度層を共存させた状態で蓄熱、放熱運転を行う実験を実施し、多温度帯の同時蓄熱が可能であることを確認した。

本報では、カスケード型蓄熱システムの設計法の確立を目標に検討した以下の３点について報告する。

- ①温度境界層部分での熱拡散および攪拌現象の把握
- ②蓄放熱反復運転下における槽内特性
- ③有効温度域形成率推定法の検討

§ 2. 熱拡散および攪拌現象の把握

カスケード型蓄熱槽は、三温度層が蓄熱槽内に存在するため互いの温度層が影響を及ぼし合う。ここでは、隣接する温度層の境界付近における影響を把握し、定量化

を行う。

2-1 実験概要

(1) 実験目的

本実験では、蓄熱槽内に与える影響が大きいとされている熱拡散現象の定量化を行い、攪拌現象を把握することにより、隣接する温度層の境界付近の明確な槽内特性把握を行う。

実験装置は、前報と同様である。

(2) 実験方法

熱拡散現象とは、図-1に示すように、温度の異なる温度層を隣接させて放置状態にする場合、水の分子運動に伴い境界付近の温度死水域が増加する現象である。また、攪拌現象とは図-2に示すように、温度の異なる温度層を隣接させた時に流入水の影響により境界付近における温度死水域が増加する現象である。温度死水域とは、蓄熱槽において温度的に有効に利用することができない部分である。

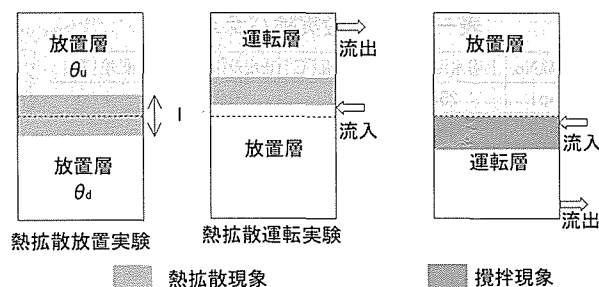


図-1 熱拡散現象の概念図

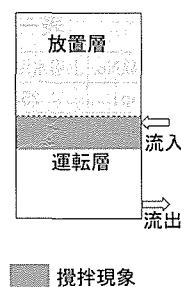


図-2 攪拌現象の概念図

* 技術研究所技術研究部建築技術研究課

(3) 比較方法

熱拡散現象、攪拌現象の要因と推測される温度差、密度差および流量により比較を行った。図-3に熱拡散放置実験の比較方法、図-4に熱拡散運転実験の比較方法、図-5に攪拌実験の比較方法を示す。

温度差比較では、熱拡散放置実験においては隣接する温度層の密度差を槽ごとに一致させ、温度差による影響の比較を行った。熱拡散運転実験、攪拌実験においては、温度層と流入水の密度差を一致させ、温度差による影響の比較を行った。

密度差比較では、熱拡散放置実験においては隣接する温度層の温度差を一致させ、密度差による影響の比較を行った。熱拡散運転実験、攪拌実験においては、温度層と流入水の温度差を一致させ、密度差による影響の比較を行った。

流量比較では、流入流量による影響の比較を行った。

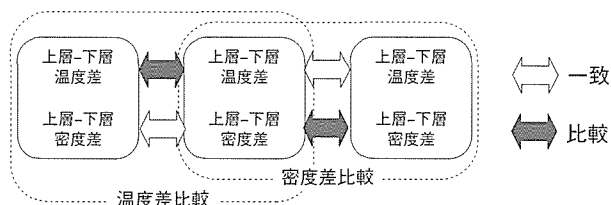


図-3 熱拡散放置実験

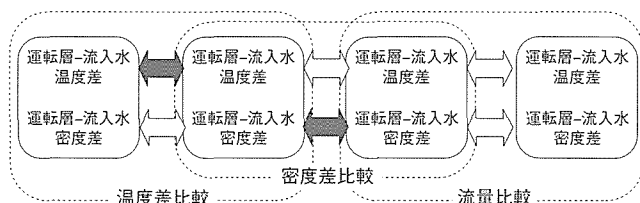


図-4 熱拡散運転実験

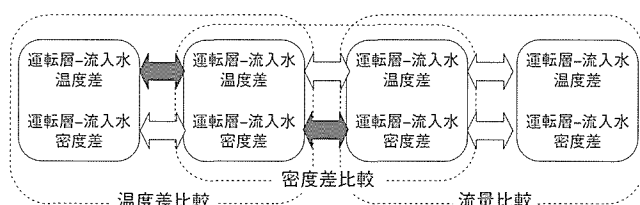


図-5 攪拌実験

(4) 実験パラメータ

本実験で扱うパラメータを、表-1に熱拡散実験(sp)、表-2に攪拌実験(st)として示す。流量比較においては、流量2.6[l/min]と流量5.2[l/min]を使用した。

表-1 熱拡散実験パラメータ

実験No.	上層水温[℃]	下層水温[℃]	密度差[kg/m³]	温度差[℃]
sp1	25	21	0.95	4
sp2	34	31	0.97	3
sp5	31	21	2.97	10
sp6	39	30	3.05	9
sp7	35	21	3.96	14
sp13	30	20	2.56	10
sp15	40	30	3.43	10
sp17	40	20	5.98	20
sp20	41	18	6.76	23

表-2 攪拌実験パラメータ

実験No.	上層		下層		温度差[℃]	密度差[kg/m³]
	初期水温・流入水温[℃]	流量[l/min]	初期水温・流入水温[℃]	流量[l/min]		
st2	35	-	25-30	5.2	5	1.62
st3	35-30	2.6	25	-	5	1.40
st4	35-30	5.2	25	-	5	1.40
st14	40-30	5.2	20	-	10	2.56
st18	40-36	5.2	28	-	8	2.55

2-2 熱拡散現象と攪拌現象の把握

(1) 放置状態における熱拡散現象の把握

放置状態の温度層が隣接している場合の熱拡散現象を把握するため、熱拡散放置実験による温度差比較、密度差比較を行った。図-6に熱拡散現象による温度死水域の推移を示す。また、図-7に時間毎の温度死水域の推移を示す。

図-6より、熱拡散現象による温度死水域の推移は、密度差を一致させれば温度差に関らず同様であることを確認した。また、密度差比較においても温度差を一致させれば密度差に関らず同様であることを確認した。図-7より、熱拡散現象による温度死水域は、時間経過、密度差（温度差）に伴って増加することを確認した。

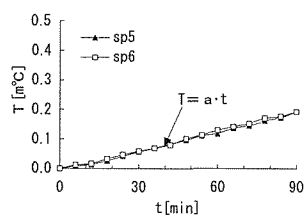


図-6 温度死水域（温度差）

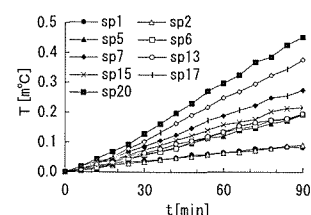


図-7 時間毎の温度死水域の増加

(2) 放置状態における熱拡散現象の定量化

図-7より、時系列における温度死水域の変化量は全実験においてほぼ比例関係にあることから、温度死水域の多変量解析を行った。その結果、熱拡散現象には低温度層密度、高温度層密度が最も影響を与える要因であることを確認した。式-1に熱拡散現象による温度死水域の傾き：aと、式-2に熱拡散現象による温度死水域：Tの予測式を示す。

$$a = 0.699173 \times pd - 0.65605 \times pu - 0.04258 \quad \text{式-1}$$

$$T = a \times t \quad \text{式-2}$$

pd：下層密度 [10³kg/m³] t：時間 [min]

pu：上層密度 [10³kg/m³]

(3) 運転状態における熱拡散現象の把握

運転層での熱拡散現象を把握するため、熱拡散運転実験による温度差比較、密度差比較、流量比較を行った。本実験条件下においては、熱拡散現象による温度死水域は温度差、密度差、流量による影響はほぼなく、増加も微小であることを確認した。

(4) 攪拌現象の把握

放置層と運転層を隣接した場合の攪拌現象を把握するため、温度差比較、密度差比較および流量比較を行った。

図-11に攪拌現象による温度差比較，図-12に攪拌現象による流量比較の温度死水域の推移を示す。

図-11より，攪拌現象による温度死水域の推移は，密度差を一致させれば温度差に関らず同様であることを確認した。また，密度差比較においても温度差を一致させれば密度差に関らず同様であることを確認した。また，攪拌現象による温度死水域は，密度差（温度差）によって推移が異なることを確認した。図-12より，流量が小さい実験は温度死水域の増加が見られなかった。これより，攪拌現象による影響は密度差（温度差），流量に依存することを確認した。

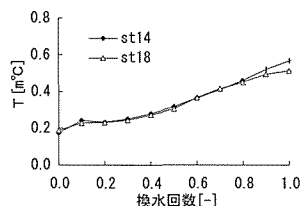


図-11 温度死水域
(温度差)

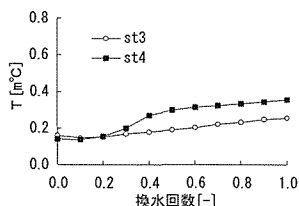


図-12 温度死水域
(流量差)

§ 3. 蓄放熱反復運転下における槽内特性

ここでは，カスケード型蓄熱槽において蓄熱，放熱運転を繰り返す反復運転を行い，槽内の挙動を把握し温度成層形成が可能かの確認を行う。

3-1 実験概要

(1) 実験目的

カスケード型蓄熱槽では，三温度層が存在するため温度層間で互いに影響を及ぼしあう特徴を持つ。そこで，本実験では影響が顕著に現れる中層付近に焦点を置き蓄熱，放熱運転を繰り返す反復運転を行い，温度成層形成への影響を確認する。

(2) 実験内容

本実験では計6Stepの蓄放熱反復運転を行い，その影響を把握する。図-13では蓄熱槽左側を放熱側，蓄熱槽右側を蓄熱側とし，反復運転パターンは表-3に示すR1実験のものを示した。R1実験では，Step1で三温度層全てが放熱運転，Step2で三温度層全てが蓄熱運転となる。このように温度層毎に運転パターンを交互に繰り返しStep6まで行うものとする。運転時における流入流量は5.2 [ℓ/min] とする。

表-3 反復運転実験パラメータ

実験 No.	Step No.	下層 槽内・流入[℃]	中層 槽内・流入[℃]	上層 槽内・流入[℃]
R1	1, 3, 5	40-30	50-40	60-50
	2, 4, 6	30-40	40-50	50-60
R2	1, 3, 5	40-30	40-50	60-50
	2, 4, 6	30-40	50-40	50-60
R3	1, 3, 5	40-30	50	60-50
	2, 4, 6	30-40	50	50-60
R4	1, 3, 5	40	50-40	60
	2, 4, 6	40	40-50	60

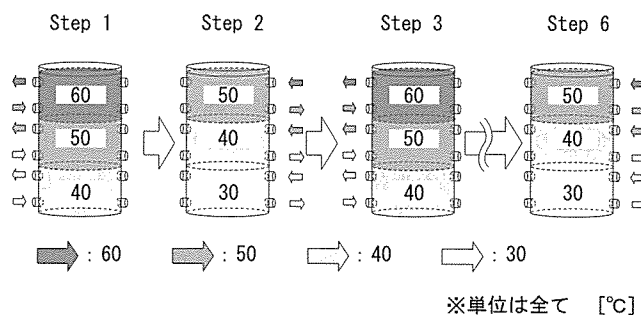


図-13 反復運転パターン概念図

3-2 反復運転におけるStep毎の推移

R1実験ではStep1, 3, 5とStep2, 4, 6, それぞれ温度成層形成にほぼ違いは見られなかった。また，有効温度域形成率においても，終始90[%]前後で推移していることを確認した。以上より，R1実験では反復運転を行っても温度成層形成を保つことが可能であることを確認した。

R2実験においても，R1実験の実験結果同様，有効温度域形成率が終始90[%]前後で推移していることから，温度成層形成を保つことが可能であることを確認した。

図-14にR3実験の結果を示す。R3実験では垂直温度分布より，中層下部において混合域の増加を確認した。有効温度域形成率においても，Step毎に値が低下することを確認した。中層は50 [℃] の放置状態であるのに対し，上層では60 [℃] -50 [℃] の蓄熱，放熱運転を繰り返しているため中層との温度差は10 [℃] もしくは温度差がなくなる。一方，下層では40 [℃] -30 [℃] で蓄熱，放熱運転を繰り返すため中層との温度差は10 [℃] もしくは20 [℃] と中層との温度差が上層よりも大きくなる。そのため，中層下部の混合域が増加したと推測できる。

R4実験では，中層において上，下層が放置状態であり温度成層形成への影響はほとんどない。中層の有効温度域形成率の推移は安定しており，温度成層形成を保つことが可能なことを確認した。また，R3実験の実験結果同様，中層との温度差が大きくなる上層下部においてStep毎に混合域が増加することを確認した。

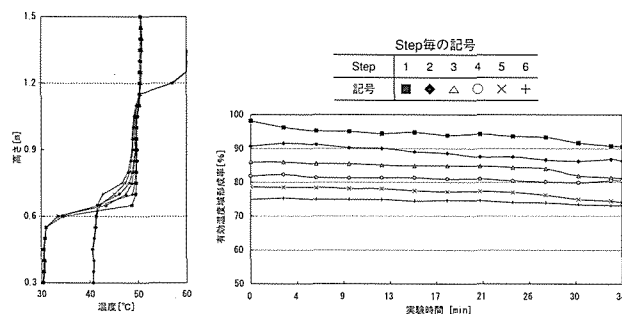


図-14 R3実験Step毎の推移
(左：各Step終了時の垂直温度分布，
右：中層の有効温度域形成率)

3-3 反復運転パターン毎の比較

三温度層全てが反復運転を行うR1実験を中心に各実験との比較を行い，反復運転パターンの違いによる中層

付近における温度成層形成の把握を行った。

(1) R1実験, R2実験比較

R1実験, R2実験の比較を行った。図-15にR1実験, R2実験の比較を示す。垂直温度分布より, R1実験, R2実験ともほぼ同様の推移であることを確認した。しかし, R2実験においてはR1実験に比べ温度層間の温度差が大きくなることで, わずかに各温度層の境界部分で混合域の増加が確認できた。

R1実験, R2実験とも中層の有効温度域形成率は90[%]前後で推移する。

以上より, R1実験, R2実験とも温度成層形成を保つことが可能ではあるものの, Stepにより温度層間の温度差が大きくなるR2実験のほうがR1実験に比べ, わずかに混合域が増加する傾向にあることを確認した。

(2) R1実験, R4実験比較

R1実験と, R4実験の比較を行った。図-16にR1実験, R4実験の比較を示す。垂直温度分布より, 中, 下層の境界付近においては, R1実験, R4実験とも若干の違いはあるものの, ほぼ同様に推移することを確認した。しかし, 上層下部においてR4実験では放置状態である上層温度が運転している中層温度より高い。そのため, R1実験に比べ混合域が増加する傾向にあることを確認した。

R1実験とR4実験では中層の有効温度域形成率の推移は同様な傾向を示した。

中層における有効温度域形成率がR1実験に比べR4実験のほうがわずかに高く推移することから, 反復運転を行っている中層においては, 運転している隣接層からの流出入水の温度による影響が大きいと推測できる。

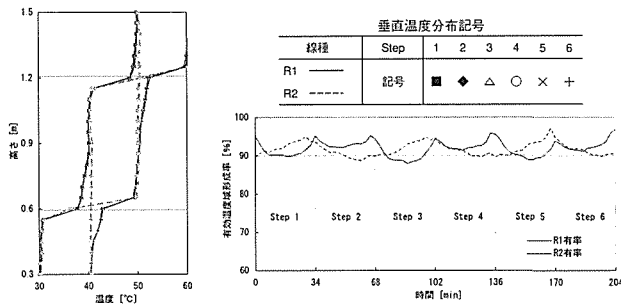


図-15 R1実験, R2実験比較
(左: 各Step終了時の垂直温度分布,
右: 中層の有効温度域形成率)

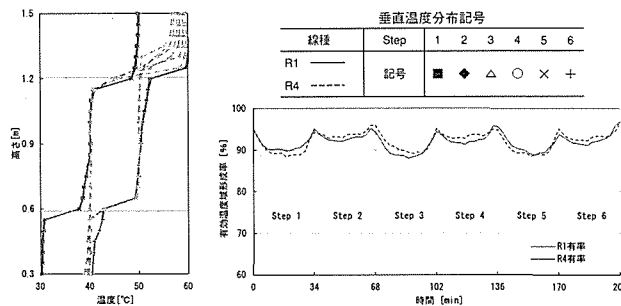


図-16 R1実験, R4実験比較
(左: 各Step終了時の垂直温度分布,
右: 中層の有効温度域形成率)

§ 4. 有効温度域形成率推定法の検討

現在まで温度成層型の評価法として有効温度域形成率を定義し評価を行ってきた。

ここでは, 既往の研究結果を踏まえ, 有効温度域形成率の推定に不足していた因子を検討し推定式を算出した結果について述べる。

4-1 実験概要

ここでは, 既報 (その1~その3) で用いた角柱, 円柱の実験装置による実験結果を用いた。また流入出管形状, 測定ポイントにおいても既報と同様である。表-4に角柱模型槽, 表-5に円柱槽の実験パラメータを示す。

表-4 角柱模型槽実験パラメータ

槽形状[m]	流入管形状[m]	流量[ℓ/min]	水温(θ _h -θ _m)[°C]
0.6×0.6×0.6	0.04×0.04	4.0	15.0-20.0
0.6×0.6×1.2	0.02×0.02	8.0	15.0-25.0
0.6×0.6×1.8		16.0	15.0-30.0

表-5 円柱模型槽実験パラメータ

槽形状[m]	流入管形状[m]	流量[ℓ/min]	水温(θ _h -θ _m)[°C]
0.58φ×0.6	0.027×0.027	1.3	40.0-60.0
0.58φ×1.2	0.054×0.0135	2.6	20.0-40.0
	0.108×0.00675	5.2	45.0-60.0
	0.03φ	7.8	30.0-45.0
	0.0045×0.05φ		50.0-60.0
	0.0022×0.1φ		40.0-60.0
	0.0045×0.1φ		
	0.0065×0.072φ		
	0.00675×0.1φ		

4-1 有効温度域形成率の分類

有効温度域形成率の分類において, 混合型の特徴を有するものをTypeA, 温度成層型の特徴を有するものをTypeB, 温度成層型の特徴を有するが有効温度域形成率が低下するものをTypeCとする。既往の研究においてAr数では定量的な分類が困難であった。そのため, Ar数では表現出来ない, 温度成層形成に影響を及ぼすと推測できる因子, 槽高さ, 動粘性係数, 槽断面流速を挙げ検討を行い, Typeの分類における無次元経験式を算出する。

TypeA, Bを分類する無次元式を算出するために流入口流速, 重力加速度およびRe_h数等を加えた分類式が式-3となる。Ar数と式-3との関係を図-17に示す。図より, TypeA, Bの分類がほぼ可能であることが分かる。分類境界線を式-4に示す。

TypeCの分類には時間経過にともない有効温度域形成率が低下するため, 槽断面流速による影響を考慮する必要がある。重力加速度, 槽断面流速およびRe_h数等を加え式-5の分類式を算出した。Ar数と式-5との関係を図-18に示す。図より, TypeB, Cの分類がほぼ可能であることが分かる。分類境界線を式-6に示す。

○TypeA, Bの分類式

$$(\Delta\rho/\rho_0) \cdot (h \cdot g/u^2) \cdot Re_h \quad \cdots\text{式-3}$$

$$\text{TypeA: } ((\Delta\rho/\rho_0) \cdot (h \cdot g/u^2) \cdot Re_h) / (44363 \times Ar_{in}^{-0.1884}) < 1$$

$$\text{TypeB: } ((\Delta\rho/\rho_0) \cdot (h \cdot g/u^2) \cdot Re_h) / (44363 \times Ar_{in}^{-0.1884}) \geq 1 \quad \cdots\text{式-4}$$

○TypeB, Cの分類式

$$(\Delta\rho/\rho_0) \cdot (h \cdot g/U^2) \cdot Re_h \quad \cdots\text{式-5}$$

$$\text{TypeB: } ((\Delta\rho/\rho_0) \cdot (h \cdot g/U^2) \cdot Re_h) / (10^{-9} \times Ar_{in}^{-1.371}) < 1$$

$$\text{TypeC: } ((\Delta\rho/\rho_0) \cdot (h \cdot g/U^2) \cdot Re_h) / (10^{-9} \times Ar_{in}^{-1.371}) \geq 1 \quad \cdots\text{式-6}$$

$\Delta\rho$: 密度差 u : 流入流速 g : 重力加速度

ρ_0 : 初期密度 Re_h : レイノルズ数 U : 槽断面流速

h : 槽高さ Ar_{in} : アルキメデス数

混合領域: $\frac{\text{換水回数0.05後における温度死水域の変化量}[\text{m}^\circ\text{C}]}{\text{任意の時間における温度死水域}[\text{m}^\circ\text{C}]} > 0.05$

$\cdots\text{式-7}$

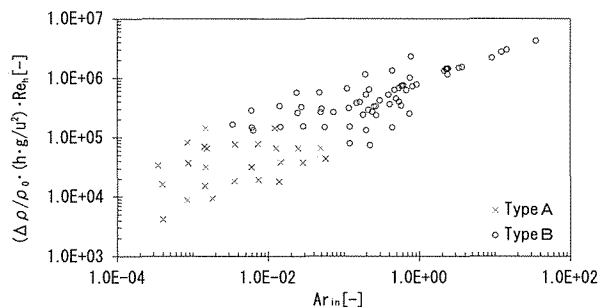


図-17 Ar_{in} 数と式1の関係

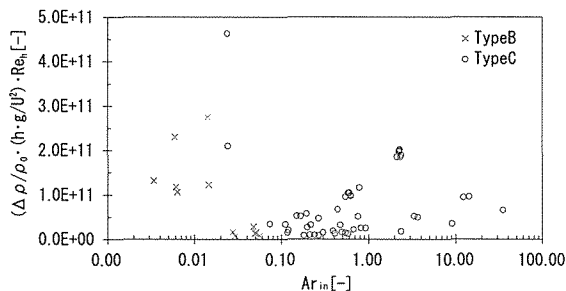


図-18 Ar_{in} 数と式3の関係

4-3 有効温度域形成率の推移

有効温度域形成率を蓄熱初期の混合領域, 換水回数0.2前後以降の安定領域, 換水回数0.8前後以降の流出領域と分割し解析を行う。

(1) 混合領域

混合領域においては流入水による攪拌の影響が大きい。そこで, 温度死水域を用いて攪拌による混合領域の槽内特性を解析する。混合領域を任意の時間の温度死水域に対し, 換水回数0.05後の温度死水域の変化量が5%を超える領域であると定義する。定義式を式-7に示す。

式-7より変化率5%を超える場合が混合領域, 変化率5%以内の場合が安定領域となる。実験値から式-7により最小2乗法を用いて重回帰分析を行い混合領域を算出する。その結果を表-6, 図-19 (No.1), 混合領域における温度死水域 (T_M) の予測式を式-8に示す。ま

た, 混合領域が終了する時間 (混合時間 (t_M)) は温度死水域を温度差と槽断面流速で除すことで算出可能である。

表-6 温度死水域についての回帰分析結果

	R	R ²
温度死水域 T_M	0.944418	0.891925

$$T_M = 5.73 \times u + 86.88 \times A_F + 0.19 \times h + 63.31 \times \rho_0 + 104.93 \times \Delta\rho - 63.24 \quad \cdots\text{式-8}$$

T_M : 混合領域の温度死水域 A_F : 流入口面積

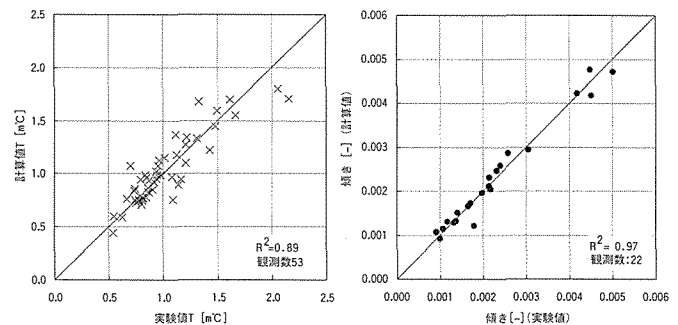


図-19 計算値と実験値についての関係 (左: No.1, 右: No.2)

(2) 流出領域

流出領域の算出には, 混合領域の長さ (混合長さ) を算出する必要がある。混合長さを算出するために温度死水域の概念図を図-20に示す。混合領域より算出した混合時間を, 槽断面流速で乗ずることで混合長さ β を算出する。実際に混合長さは, 図-20 (No.3) のような曲線を示す。混合長さ γ については経験式の算出には至っていないが, 経験的にほぼ β の3倍程度になる。以上より, 槽内の温度死水域が流出を始める時間 (流出時間 (t_{out})) は式-9となる。

$$t_{out} = t - t_M \times 3 \quad \cdots\text{式-9}$$

t_{out} : 流出時間

t_M : 混合時間

(3) 安定領域

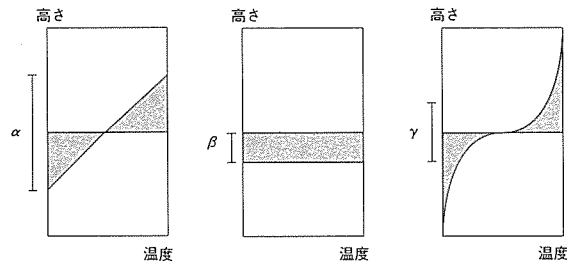
温度成層型蓄熱槽の槽内特性として, 混合領域における温度死水域がある深さで安定すると, 以降はその温度死水域が熱拡散現象により徐々に増加する。そのため, 安定領域における熱拡散現象の影響を検討し, 安定領域についての予測式を算出する必要がある。

温度死水域により熱拡散現象の検討を行うため, 異なる温度層を二層に積層させる放置実験において, 影響の大きいと推測できる高さ0.6[m]温度層の境界付近の解析を行う。既往の研究において熱拡散現象は, 90分間の放置実験において高さ0.6[m] ± 0.1[m]の領域に影響を及ぼすことが確認されている。放置実験の温度死水域の変化量はほぼ時間と比例関係にあることが確認されている。これより, 放置実験における温度死水域の傾き (a_1) を算出する。各パラメータにおける多変量解析結果を

表一7, 図一19 (No.2) に示す。また, 熱拡散による温度死水域 (T_1) の予測式を式一10, 11に示す。

通常の運転では放置状態ではないため, 流入水の影響が大きい。実際の運転においては, 熱拡散現象の他に流入水による影響 (混合促進現象) がある。

そこでこの混合促進現象について, 混合時間と流出時間の差 (促進時間), 槽断面流速 (U) を考慮し, 促進時間における温度死水域の変化量を算出する。混合促進現象による傾き (a_2), 促進時間の温度死水域 (T_2) を多変量解析により予測式を算出した。結果を表-8に, 予測式を式一12, 13に示す。



図一20 温度死水域の概念図(左よりNo1, No.2, No.3)

表一7 傾きにおける回帰分析結果

	R	R ²
熱拡散における傾き (a_1)	0.985916	0.972030

$$a_1 = 0.699 \times p_d - 0.66 \times p_u - 0.04258 \quad \cdots \text{式一10}$$

$$T_1 = a_1 \times t \quad \cdots \text{式一11}$$

a : 熱拡散による温度死水域の傾き p_d : 下層密度

T_1 : 熱拡散による温度死水域 p_u : 上層密度

表一8 混合促進現象における回帰分析結果

	R	R ²
混合促進現象における傾き (a_2)	0.903153	0.815685

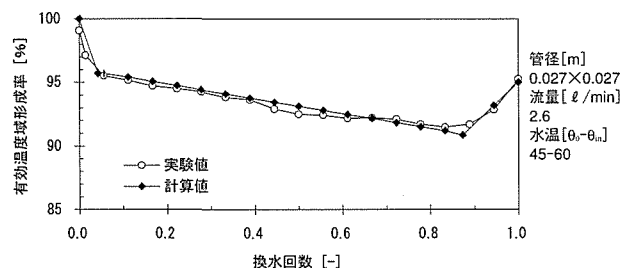
$$a_2 = -0.013 \times u + 0.085 \times p_0 - 1.114 p_{in} + 0.755 \times A_F + 0.005 \times U \quad \cdots \text{式一12}$$

$$T_2 = a_2 \times t \quad \cdots \text{式一13}$$

$$T_s = T_1 + T_2 \quad \cdots \text{式一14}$$

a_2 : 混合促進係数 T_2 : 促進時間の温度死水域

T_s : 安定領域の温度死水域 p_{in} : 流入密度



図一21 有効温度域形成率の実験値と予測値

§ 5. おわりに

本報において, 隣接する温度層の境界付近の温度成層

に影響を与える熱拡散現象を把握し, その予測を行った。熱拡散現象においては, 時間経過に伴い温度死水域が増加することを確認し, 温度死水域の予測式を算出した。また, 攪拌現象においては, 密度差 (温度差), 流量によって温度死水域の推移が異なることを確認した。

また, 三温度層において蓄熱, 放熱運転を繰り返す反復運転を行い, 中層に焦点をおき温度成層形成を保つことが可能かの確認を行った。中層が放置状態にあるR3実験のみ, 運転している温度層から影響を受け温度成層形成が乱れることを確認した。また, 中層が運転を行う反復運転においては, 中層の温度成層形成は保つことが可能であることを確認した。

最後に, 有効温度域形成率の推移による分類を行った。また, 有効温度域形成率の推移を混合領域, 安定領域, 流出領域に分類を行い予測式を算出した。各領域毎に算出した式により有効温度域形成率を推定した結果を図一21に示す。図より, 実験値と計算値はほぼ一致していることを確認した。

なお, 本研究は経済産業省「生活価値創造住宅開発プロジェクト」の一環として行われたものである。

[参考文献]

中島康孝 「蓄熱槽 (1) ~ (7)」

1979~1980年 空気調和衛生工学 Vol.54, No.6~No.11

中原, 相良 他 蓄熱槽に関する研究 (1) ~ (5)

1981~1987年 空気調和衛生工学会論文集 No.16, 17, 20, 30, 35

中島康孝 他 カスケード型蓄熱槽に関する研究 その1~その8

1997~2000年 日本建築学会大会学術講演論文集