

令和3年度

修士論文

複数温度帯の蓄熱に対応した温度成層型蓄熱槽に
関する研究

指導教員 北野博亮准教授

三重大学大学院工学研究科

建築学専攻

篠原将太郎

目次

第 1 章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	2
1.2 温度成層型蓄熱槽の概要.....	2
1.3 既往の研究.....	3
1.4 研究目的.....	3
1.5 研究概要.....	3
第 2 章 複数温度帯の蓄熱に対応した蓄熱槽の模型実験.....	4
2.1 はじめに.....	5
2.2 模型実験概要.....	5
2.3 実験条件.....	10
2.4 第 2 章まとめ.....	11
第 3 章 模型実験と CFD 解析の結果.....	12
3.1 はじめに.....	13
3.2 CFD 解析の概要.....	13
3.2.1 解析対象.....	13
3.2.2 計算条件.....	14
3.3 模型実験結果と CFD 解析結果の比較.....	15
3.4 第 3 章まとめ.....	20
第 4 章 複数温度帯の蓄熱に対応した蓄熱槽の CFD による数値実験.....	21
4.1 はじめに.....	22
4.2 解析対象.....	22
4.3 計算条件.....	23
4.4 計算結果.....	25
4.4.1 流入位置による比較.....	25
4.4.2 流入口の形状の違いによる比較.....	31
4.5 第 4 章まとめ.....	34
第 5 章 任意の流入出位置に対応した温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデル.....	35
5.1 はじめに.....	36
5.2 槽内混合モデルの概要.....	36
5.3 モデルパラメータの同定.....	38
5.3.1 CFD 解析によるパラメータ同定概要.....	38
5.3.2 モデルパラメータの同定結果.....	38
5.4 槽内混合モデルの計算結果と CFD 解析結果の比較.....	40
5.5 第 5 章まとめ.....	56

第 6 章 総括.....	57
記号.....	59
参考文献.....	60
謝辞.....	60

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年、自然エネルギーや廃熱、熱回収型ヒートポンプ等の省エネルギー技術の利用において、熱の需要と供給の時間的なアンバランスが問題として挙げられる。この問題を改善する有効な省エネルギー手法として考えているのが、蓄熱システムとしての温度成層型蓄熱槽と、熱のカスケード利用を組み合わせた、複数温度帯の蓄熱が可能な温度成層型蓄熱槽である。提案する蓄熱槽に用いられている熱のカスケード利用とは、燃料の燃焼熱などの高温の熱を発電に利用し、その排熱を蒸気や温水として利用するなど、熱エネルギーの温度帯に応じてさまざまな用途に段階的に活用することである。

本研究では、再生可能エネルギーや廃熱などを最大限利用するため、複数の熱源からの冷熱や温熱を温度帯や熱量に応じて蓄熱し、冷暖房や給湯など複数の用途に利用することが可能な蓄熱システムについて述べる。

1.2 温度成層型蓄熱槽の概要

建築分野では、安全性や経済性の高い水を用いた顕熱蓄熱が一般的であり、本研究でも、水の密度差を利用して高温水と低温水の混合を抑制するタイプの温度成層型蓄熱槽を対象とする。図 1.1 に示したように、一般的な温度成層型蓄熱槽は、槽の上部と下部に流入出口を設けて、一つの温度帯（例えば、冷房 7–12°C）で単一用途の蓄熱を行うものである。一方、本研究で対象とする蓄熱槽（図 1.2）は、槽の高さ方向に複数の流入出口を設置し、複数の温度帯の冷温水を単一の水槽で蓄熱しようとするものである。もちろん温度帯に応じて個別に蓄熱槽を設けることでも同等の機能を持たせることも可能であるが、単一水槽とし、冷暖房負荷等に応じて各温度帯の蓄熱容量を可変とすることで、トータルの槽容積を大幅に縮減でき、蓄熱槽構築コストの低減や空間の有効利用が期待できる。図 1.2 のように、蓄熱によって利用温度の異なる熱エネルギーの需給バランスが調整できれば、さらなるエネルギーの有効利用が可能であると考えられる。

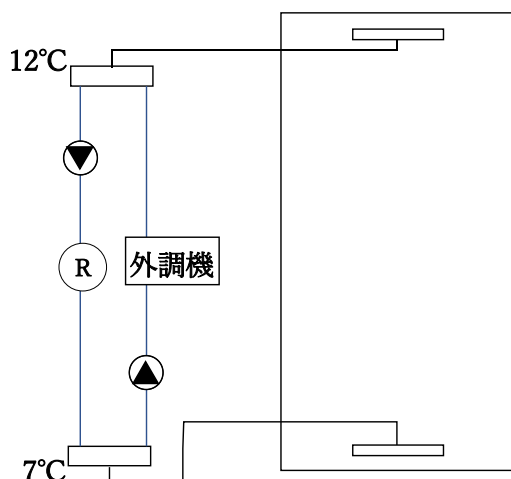


図 1.1 一般的な温度成層型蓄熱槽

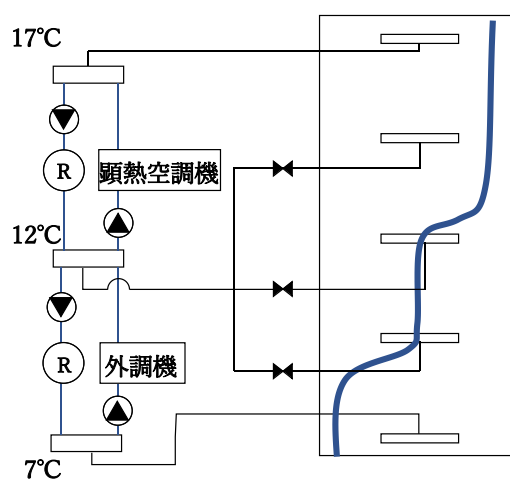


図 1.2 提案する温度成層型蓄熱槽

1.3 既往の研究

前項に示したような蓄熱槽は、中島ら¹⁾によって既にカスケード型蓄熱槽として提案されており、模型実験によって複数の温度成層を持つ蓄熱槽が実現可能であることは確認されている。しかしながら、槽内温度分布予測のためのモデルの構築まではなされておらず、現状ではシミュレーションによる性能予測ができない状況にあり、蓄熱槽を含めたシステムの評価方法や設計手法の検討も困難である。また、温度成層型蓄熱槽への流入位置を、流入温度と槽内温度がほぼ等しい位置となるように流入口を工夫した蓄熱槽に関する研究は、国内外²⁾³⁾でなされているが、実験による槽内混合性状の把握にとどまるものが多く、任意の位置からの流入水と槽内水との混合を適切に考慮したモデルはなく、槽内温度を精度良く予測できる簡易なモデルの開発が求められる。

1.4 研究目的

再生可能エネルギーや廃熱などを最大限利用するため、複数の温度成層が形成される蓄熱槽に任意の高さにおいて流入出がある場合に、簡易に槽内温度を予測できる槽内混合モデルの開発を目的としている。

本研究では、はじめに複数温度帯の蓄熱に対応した温度成層型蓄熱槽について蓄熱槽性能の把握のための模型実験を行い、また CFD 解析と比較して計算精度の検証を行う。その後、温度成層化した蓄熱槽内の混合性状への流入位置等の流入条件の影響について数値実験を行う。

そして、任意の流入出位置に対応した温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデルのモデルパラメータの同定を行い、槽内混合モデルと CFD 解析結果の比較を行う。

1.5 研究概要

第 2 章では模型実験の概要を述べ、複数温度帯の蓄熱に対応した温度成層型蓄熱槽の実験目的、実験条件を述べる。

第 3 章では第 2 章で述べた模型実験の実験結果を CFD 解析と比較し、考察する。

第 4 章では複数温度帯の蓄熱に対応した温度成層型蓄熱槽の CFD による解析について、CFD 解析の概要、解析対象、計算条件、計算結果について述べる。

第 5 章では任意の流入出位置に対応した温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデルの概要、モデルパラメータの同定、槽内混合モデルと CFD 解析結果の比較について述べる。

第 6 章では本研究で得られた結果について述べる。

第 2 章

複数温度帯の蓄熱に対応した蓄熱槽の模型実験

2.1 はじめに

本章では鉛直方向に複数の流入出口を設けることで、複数温度帯での蓄熱を可能とした温度成層型蓄熱槽を対象とし、蓄熱槽性能の把握のための模型実験を行った。

はじめに、模型実験概要について述べ、次に実験条件、実験方法について述べる。

2.2 模型実験概要

図 2.1 に本研究で作成した実験装置の概略図、図 2.2 に蓄熱槽の平面図、図 2.3 に流入出口の形状を示す。

本研究では温水槽（写真 1）にヒーターを用い、冷水槽（写真 2）には冷却水循環装置を用いた。蓄熱槽の周りには厚さ 50mm の断熱材を取り付け、また、温水槽と冷水槽の周りにも断熱材を取り付けて、外気による熱損失を小さくし流入出口への入口温度の影響を小さくなるようにした。

蓄熱槽への温水の流入は、温水槽内で熱媒をヒーターで温め、温まった熱媒に配管をくぐらせポンプで循環させ、配管内の水と熱交換させることにより行われる。流入出口からの流入温度を一定にするために温水槽内にバスポンプを設置し、バスポンプで熱媒を循環させることにより温水槽内の温度が一樣になるようにした。蓄熱槽への冷水の流入についても温水槽と同様の仕組みで行った。

蓄熱槽は円筒形で容量が 170L のものを使用している。蓄熱槽内の流入出口について、本研究では円盤型を使用する。上部と真ん中の流入出口は給水、上部と下部の流入出口は流出できるようにしている。蓄熱槽への給水にはポンプを使用し、流量をバルブ 10 で調節できるようにした。

測定項目は流入流量、3つの流入出口の流入、流出温度、蓄熱槽内の水温を測定した。

各温度と流入流量は T 型熱電対、流量計、データロガーを用いて 10 秒の測定間隔で測定した。3つの流入出口の給水、取水温度、蓄熱槽内の水温を測るのに T 型熱電対を使用した。流量計には ASI-100 を使用した。

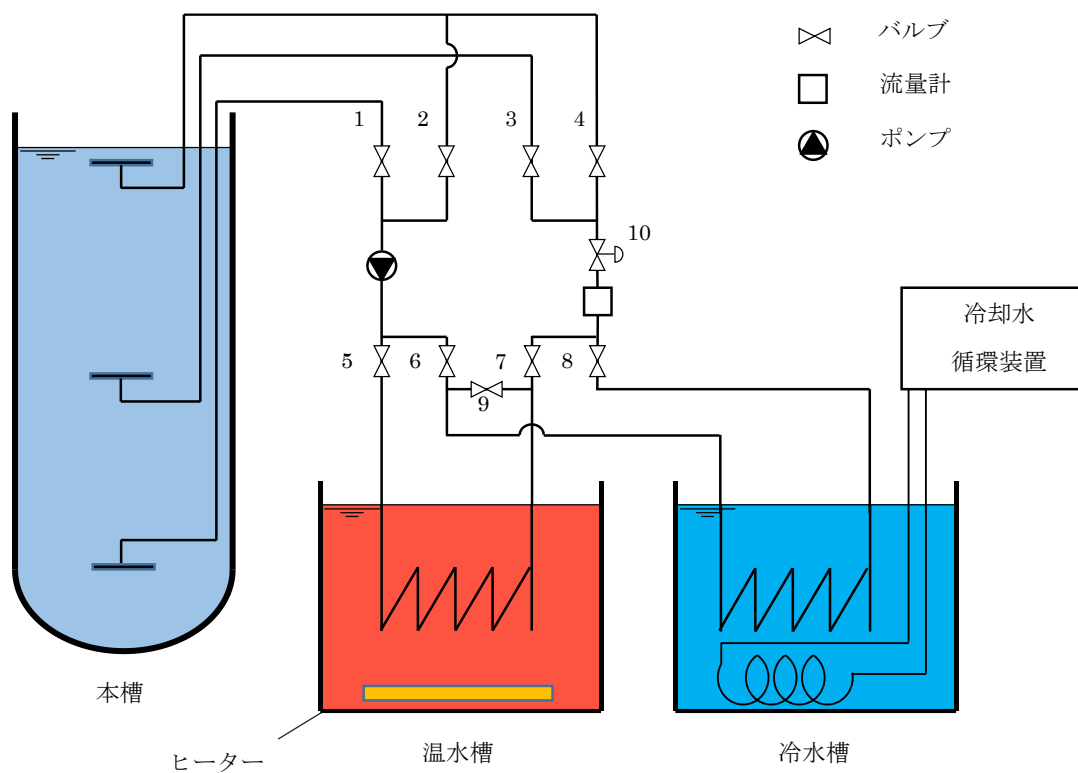


図 2.1 実験装置の概略図



写真 1 温水槽



写真 2 冷水槽

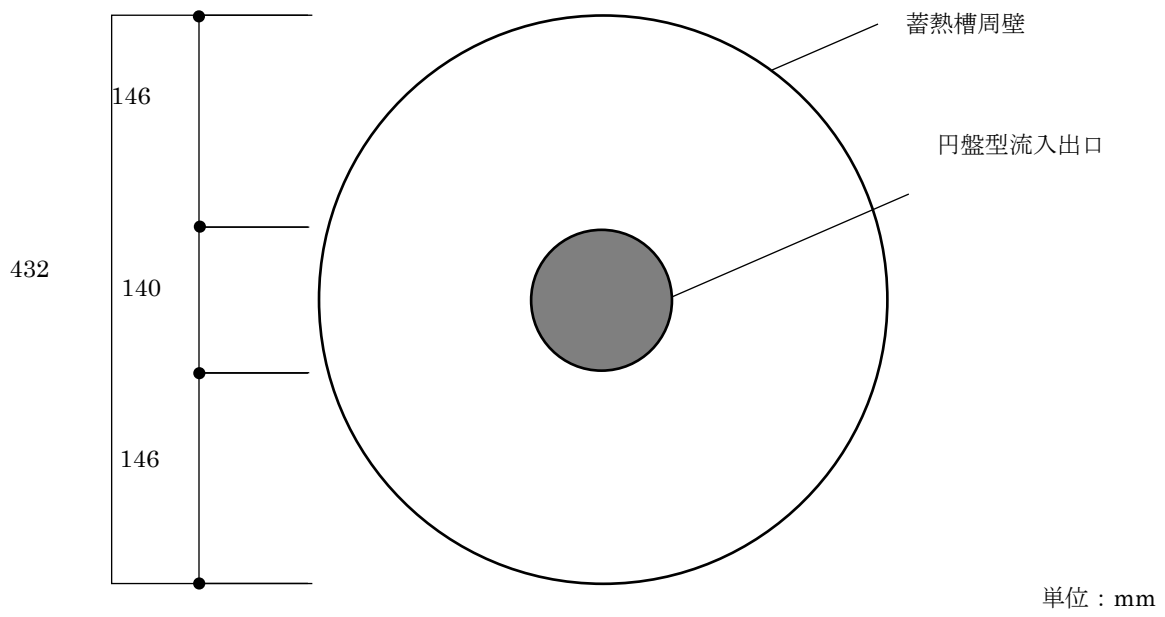


図 2.2 蓄熱槽平面図

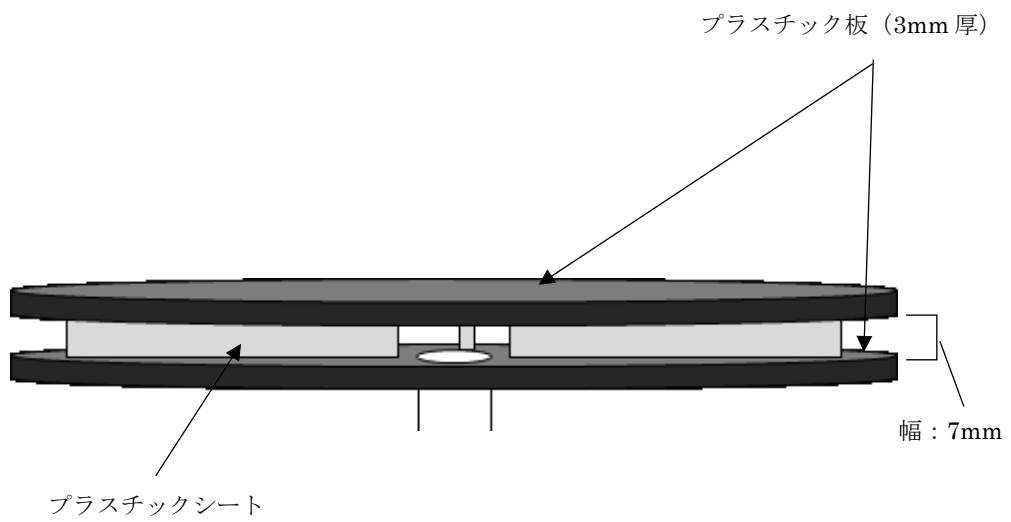


図 2.3 流入出口の形状

測定項目である3つの流入出口の流入、流出温度、蓄熱槽内の水温23点の測定位置を図2.4に示す。流入出口の温度は図中のように円盤吹き出し口の配管内の温度をそれぞれ2点ずつ測定した。測定点は槽底から100mmの高さから50mm間隔で配置した。また、表2-1に測定点の詳細な位置を示す

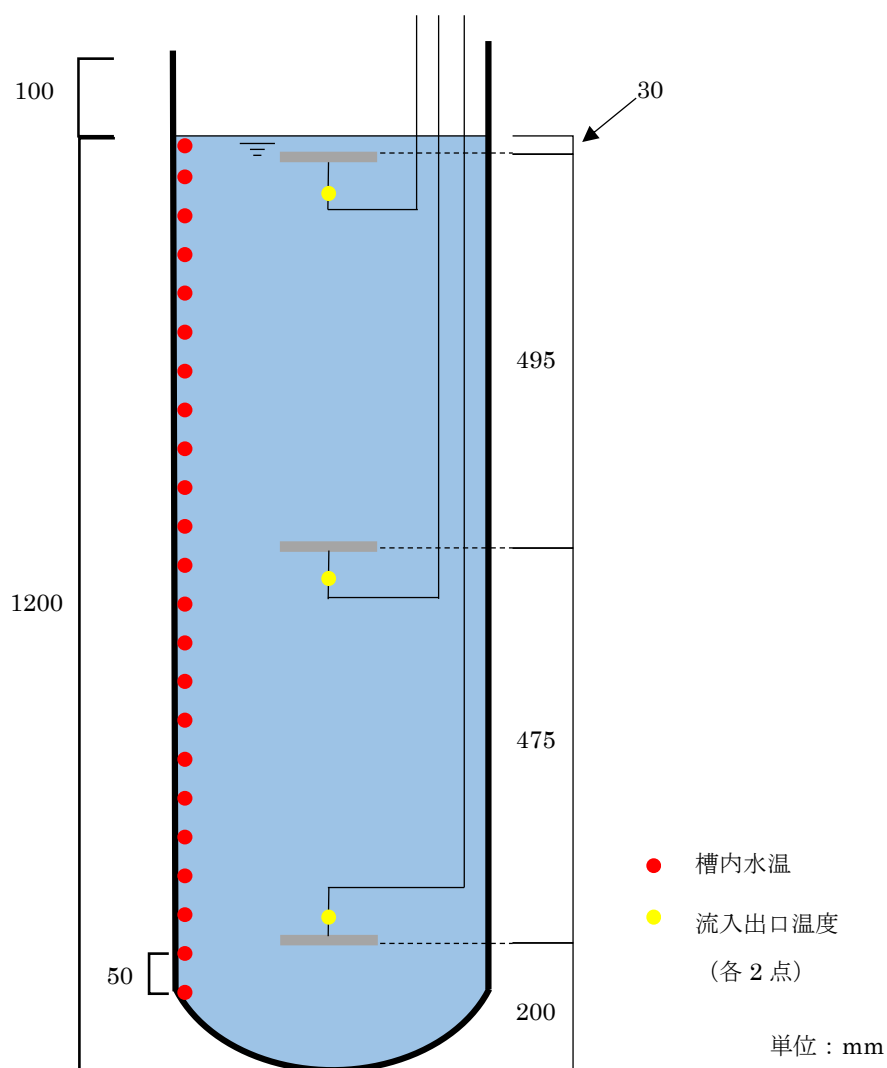


図 2.4 測定ポイント

表 2.1 測定項目

データロガーNo.	単位	槽底からの高さ(m)	測定対象
1	L/min	-	給水流量
2	°C	-	流入口温度 (上)
3	°C	-	流入口温度 (上)
4	°C	-	流入口温度 (中)
5	°C	-	流入口温度 (中)
6	°C	-	流出口温度 (下)
7	°C	-	流出口温度 (下)
8	°C	1.19	槽内水温
9	°C	1.15	槽内水温
10	°C	1.1	槽内水温
11	°C	1.05	槽内水温
12	°C	1	槽内水温
13	°C	0.95	槽内水温
14	°C	0.9	槽内水温
15	°C	0.85	槽内水温
16	°C	0.8	槽内水温
17	°C	0.75	槽内水温
18	°C	0.7	槽内水温
19	°C	0.65	槽内水温
20	°C	0.6	槽内水温
21	°C	0.55	槽内水温
22	°C	0.5	槽内水温
23	°C	0.45	槽内水温
24	°C	0.4	槽内水温
25	°C	0.35	槽内水温
26	°C	0.3	槽内水温
27	°C	0.25	槽内水温
28	°C	0.2	槽内水温
29	°C	0.15	槽内水温
30	°C	0.1	槽内水温

2.3 実験条件

表 2.2 に実験条件を示す。本研究で行った実験は図 2.5 に示す A、B、C の 3 ケースの初期条件においてそれぞれ流量を変えた 9 種類とした。A は一様の初期温度の下部流出・上部高温入力の一様な温度成層型蓄熱槽を想定した実験であり、B は中央の流入出付近に温度成層がある温度分布を初期条件として下部から流出し中央に流入する実験、C は初期温度の温度成層位置が B よりも高い場合の実験を想定したものである。

表 2.2 実験条件

実験番号	流量 [m ³ /h]	初期温度分布 [°C]	初期温度成層の高さ [m]	流入温度 [°C]	入口 アルキメデス数
case A1	0.048	25.0	-	(上部) 30.6	5.894
case A2	0.084	26.0	-	(上部) 31.0	1.736
case A3	0.39	20.0	-	(上部) 25.2	0.067
case B1	0.047	20.0-29.0	0.65	(中間) 25.6	4.980
case B2	0.083	25.0-35.0	0.65	(中間) 30.1	1.732
case B3	0.34	20.0-30.0	0.65	(中間) 25.5	0.097
case C1	0.048	20.0-30.0	0.75	(中間) 25.9	5.109
case C2	0.083	20.0-30.0	0.75	(中間) 25.9	1.707
case C3	0.32	20.0-30.0	0.75	(中間) 25.0	0.093

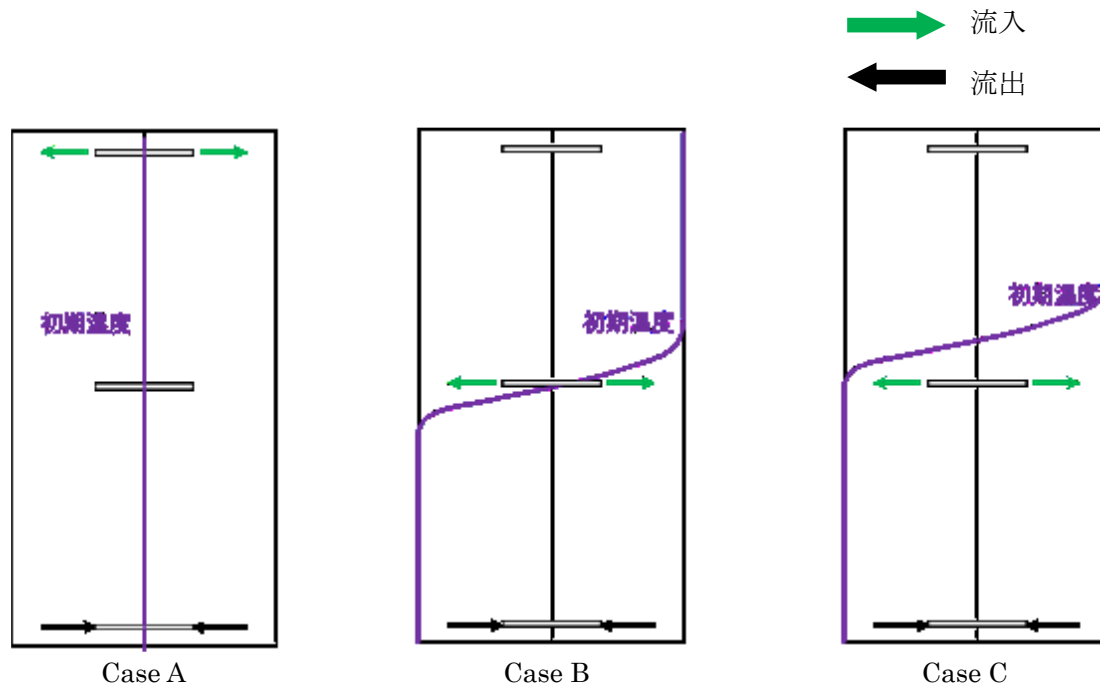


図 2.5 Case 毎の流入出方法

2.4 第 2 章まとめ

鉛直方向に複数の流入出口を設けることで、複数温度帯での蓄熱を可能とした温度成層型蓄熱槽を対象とし、蓄熱槽性能の把握のための模型実験を行った。本章では模型実験概要、実験手順、実験条件について述べた。次章では模型実験と同条件の CFD 解析概要、模型実験結果と CFD 解析結果の比較について述べる。

第 3 章

模型実験と CFD 解析の結果

3.1 はじめに

本章では、前章で述べた模型実験と同条件で CFD 解析を行い、換水回数 0.1 回毎の槽内温度分布の推移について実験結果と CFD 解析結果を比較することで CFD 解析の計算精度の検証を行った。

3.2 CFD 解析の概要

CFD とは Computational Fluid Dynamics の略称で、流体の運動方程式をコンピュータ上で解くことにより、流体の流れの様子を再現することができる流体の数値シミュレーションである。CFD には様々なソフトが存在するが、本研究では STREAM というソフトを使用している。

3.2.1 解析対象

解析する蓄熱槽の概要を以下に示す。解析対象の実験槽の軸対称性を考慮して、図 3.1 に示した円筒座標系の 2 次元 (r - z) の非定常解析を行った。蓄熱槽内温度の CFD 解析の精度検証を行うため、前章の表 2.2 に示した実験と同様の計算条件を設定した。

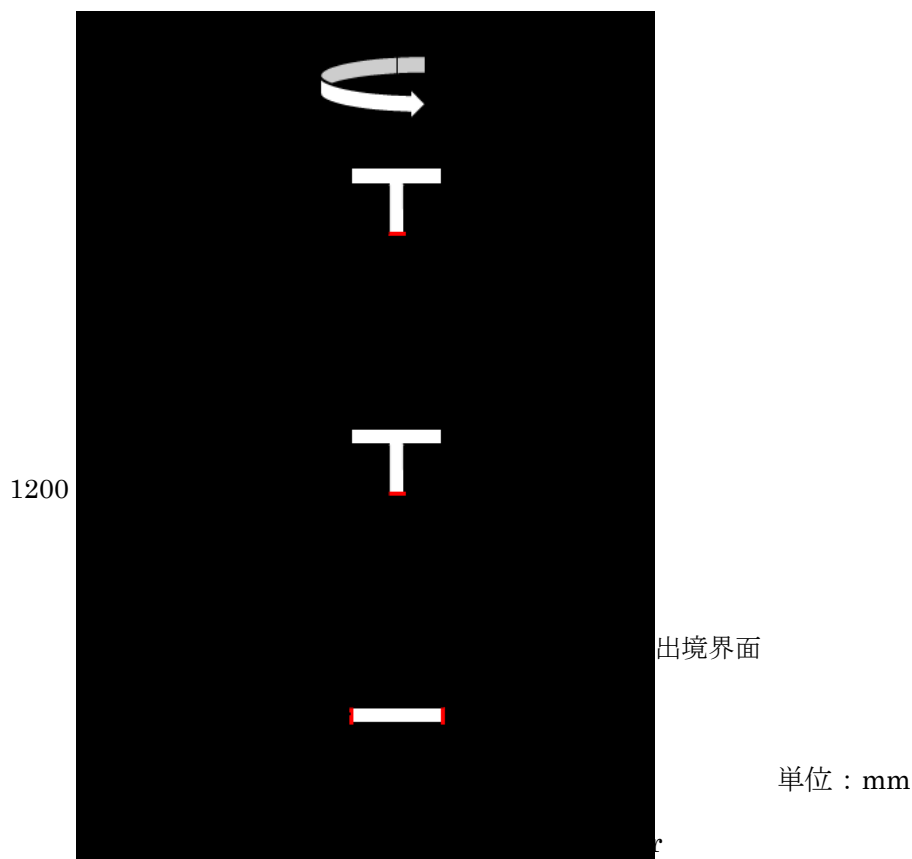


図 3.1 CFD 解析対象図

3.2.2 計算条件

実験結果との比較による CFD 解析の妥当性の検証をするための CFD 解析条件を表 3.1 に示す。

計算に用いた流入温度は、実験時の状態を再現するために時々刻々と変化する流入温度の平均値の実験データを適当な時間で分割し、その区間ごとに経過時の多項式として流入温度の近似式を作成した。そして作成した近似式を導入し、流入境界条件の関数として流入温度を再現して解析を行った。図 3.2 に Case A1 での近似式による流入温度の近似曲線と実験データの一例を示す。実線が実験データ、点線が近似線を示す。

CFD 解析による槽内鉛直温度分布は槽底部から水面までを鉛直方向に 50 分割し算出している。

表 3.1 実験との比較による妥当性検証の CFD 解析条件

解析ソフト	STREAM Ver.2020	
乱流モデル	RNG k-ε モデル	
総メッシュ数	259,200	
計算アルゴリズム	非定常(SIMPLE)	
移流項	QUICK	
計算時間間隔	caseA1,A2,B1,B2,C1,C2 : 0.1s	
	caseA3,B3,C3 : 0.01s	
水密度	多項式近似(4次)	
境界条件	流入口	流量規定
	流出口	自然流出
	槽壁	No slip、断熱
	水面	Free slip

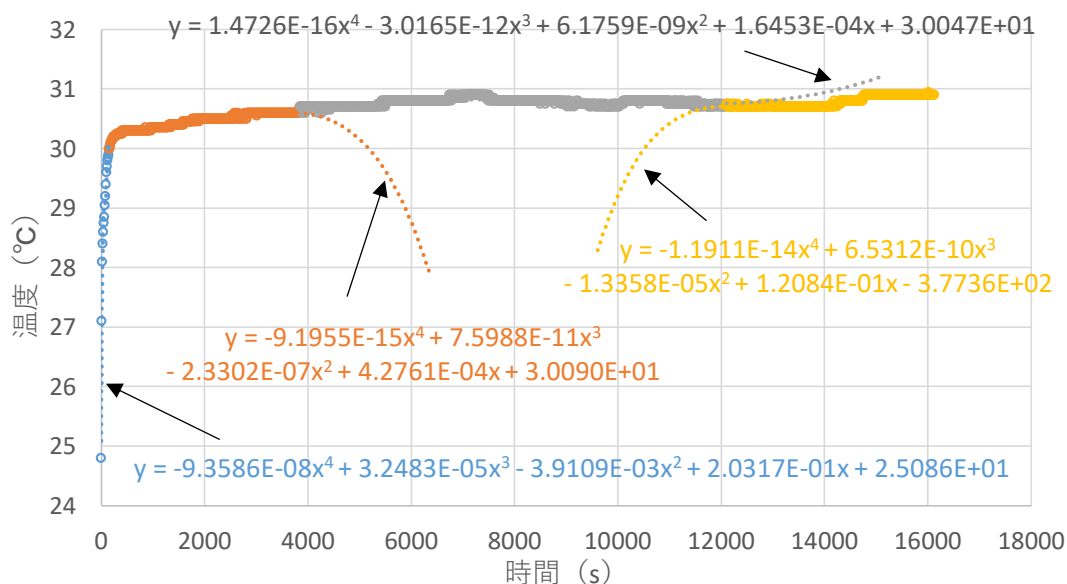


図 3.2 流入温度の近似曲線の一例

3.3 模型実験結果と CFD 解析結果の比較

以下に蓄熱実験の入力条件及び温度分布の結果を示す。

図 3.3～図 3.11 に表 2-2 に示した 9 つの蓄熱実験と CFD 解析によって得られた槽内温度分布の結果を示す。横軸を温度、縦軸を槽底からの高さとして、図 3-3～図 3-5 は換水回数 t^* を 0.2 回毎に 0.0 から 1.0 まで、図 3-6～図 3-11 は換水回数 t^* を 0.1 回毎に 0.0 から 0.25 まで示した。また、図中の緑色の矢印が流入位置、黒色の矢印が流出位置を示している。

図 3.3～図 3.5 の Case A について、良好な温度成層が形成されていることがわかる。実験と CFD 解析の温度分布を比較すると、特に図 3.3 の流量 $0.048\text{m}^3/\text{h}$ の実験では、実験時間が 3 時間程度と他の条件と比較して長いため、CFD 解析では考慮していない槽側面や水面からの熱損失のために、温度成層部の上部で温度低下がみられる。この点を除いて、CFD 解析の結果と実験結果はよく一致している。

図 3.6～図 3.8 の Case B の、温度成層に槽上部と下部の中間の温度の流入がある場合の結果から、流入口と流出口の間に、新たに温度成層が形成されることがわかる。また、既存の温度成層の温度勾配に変化はなく、複数の温度帯での蓄熱が十分に可能であることが確認できた。CFD 解析においても同様の傾向がみられ、槽内温度分布を十分な精度で予測できることがわかる。

図 3.9～図 3.11 の Case C の、初期温度の温度成層位置が Case B よりも高い場合の結果でも Case B と同様に、流入口と流出口の間に、新たに温度成層が形成されることがわかる。また、CFD 解析の結果と実験結果はよく一致している。

図 3.3～図 3.11 の各ケースにおいて、流量の大きい条件の温度成層部の温度勾配が大きくなっているが、これは、実験時間が短いことで熱拡散の影響が小さくなっているためである。また、CFD 解析においても同様の傾向が見られ、槽内温度分布を十分な精度で予測できることが分かる。

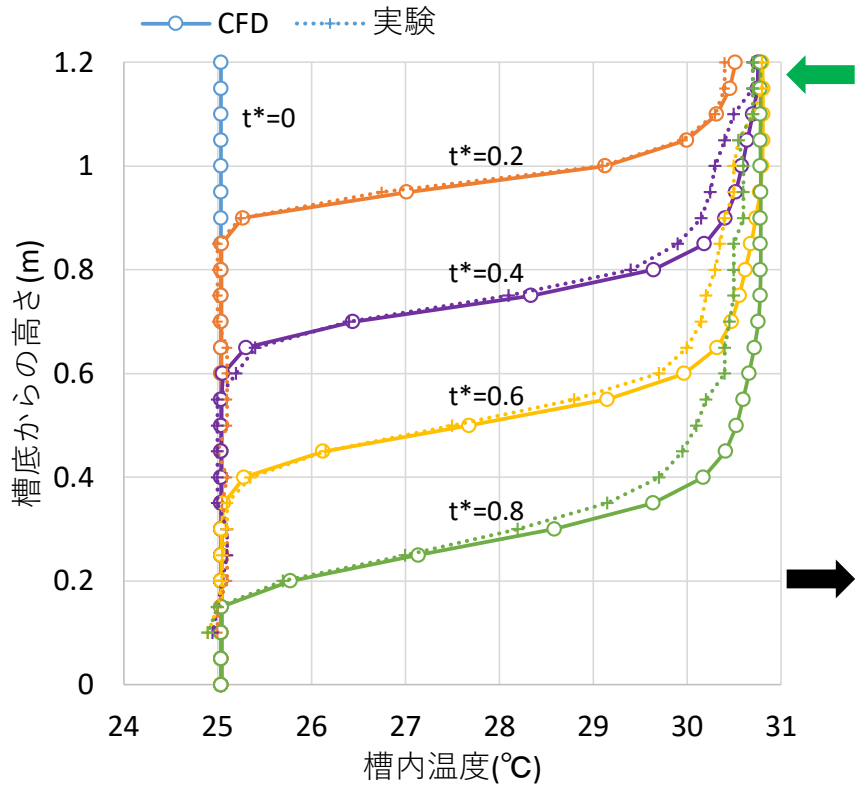


図 3.3 Case A1

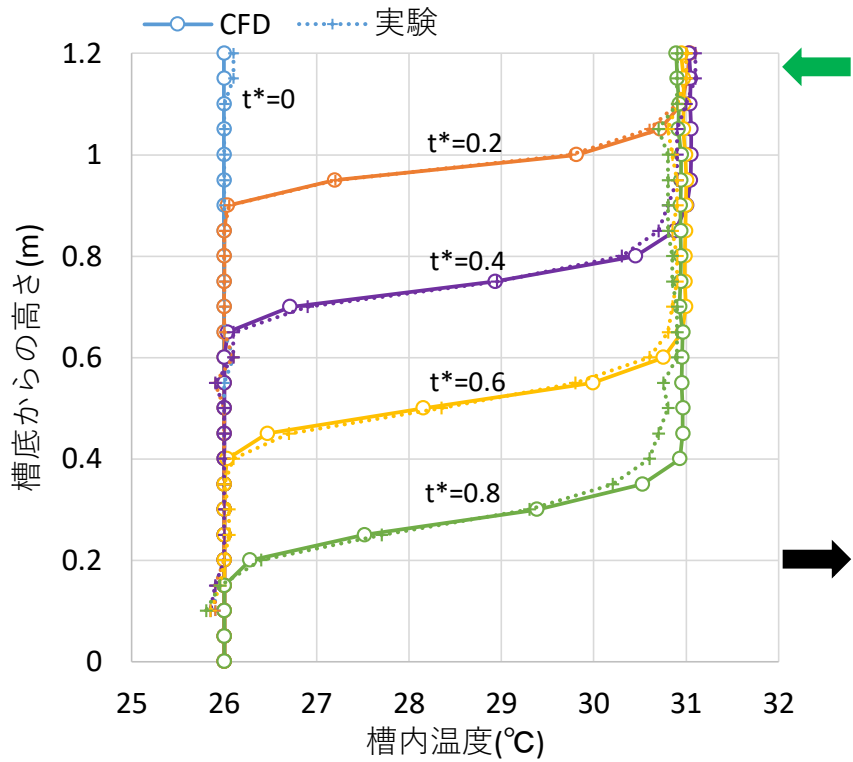


図 3.4 Case A2

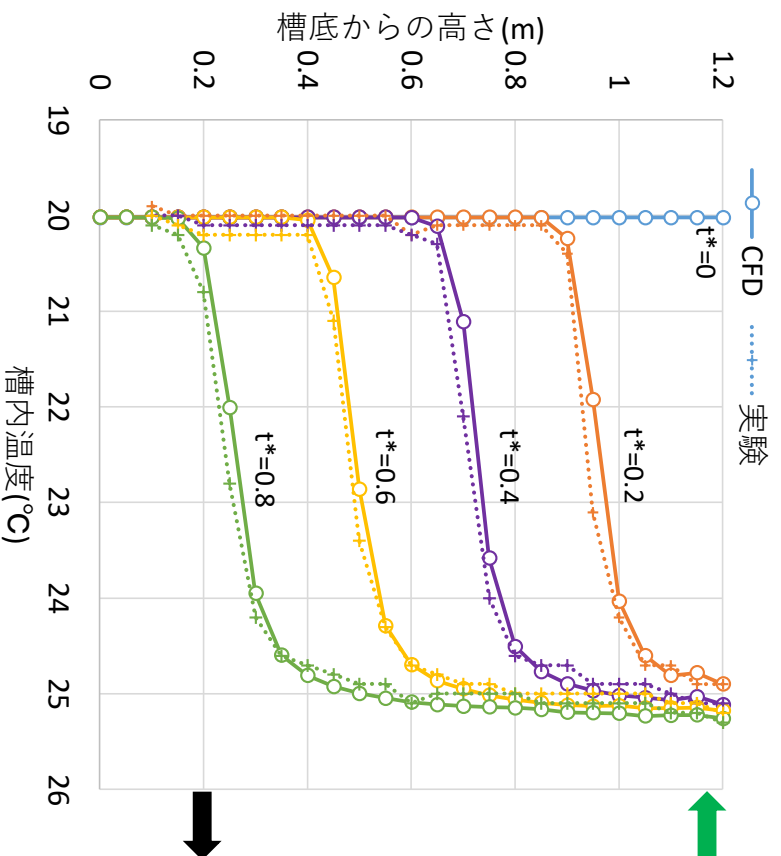


図 3.5 Case A3

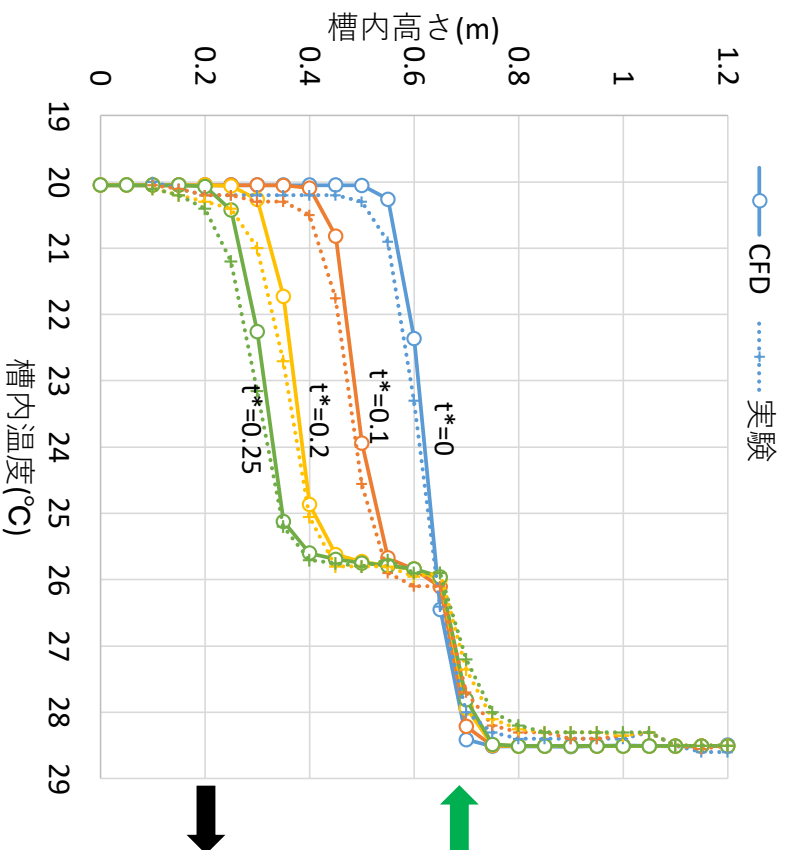


図 3.6 Case B1

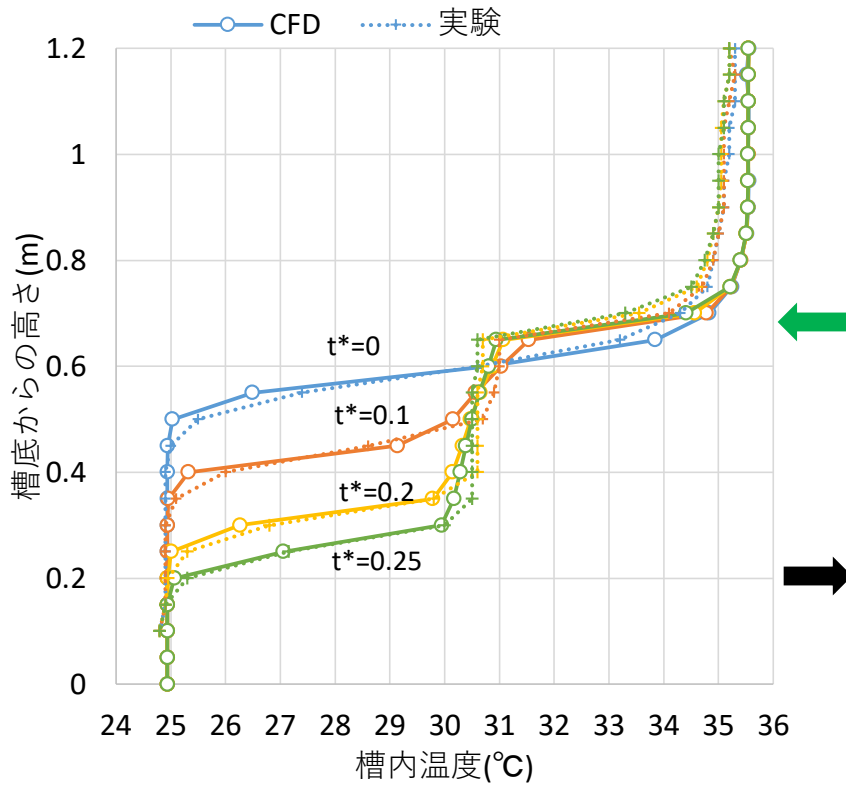


図 3.7 Case B2

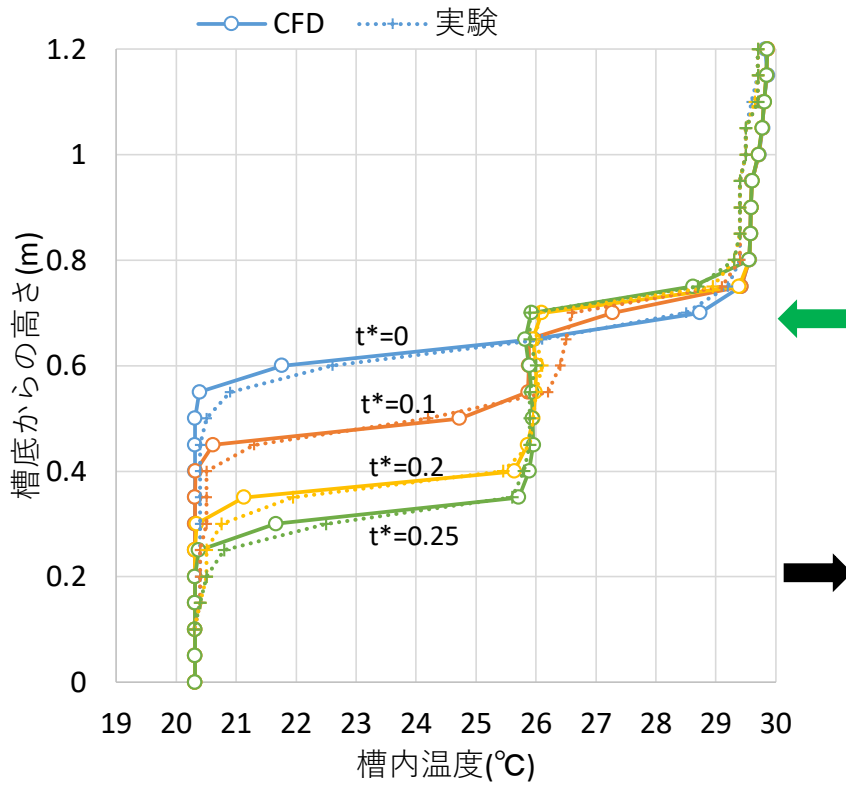


図 3.8 Case B3

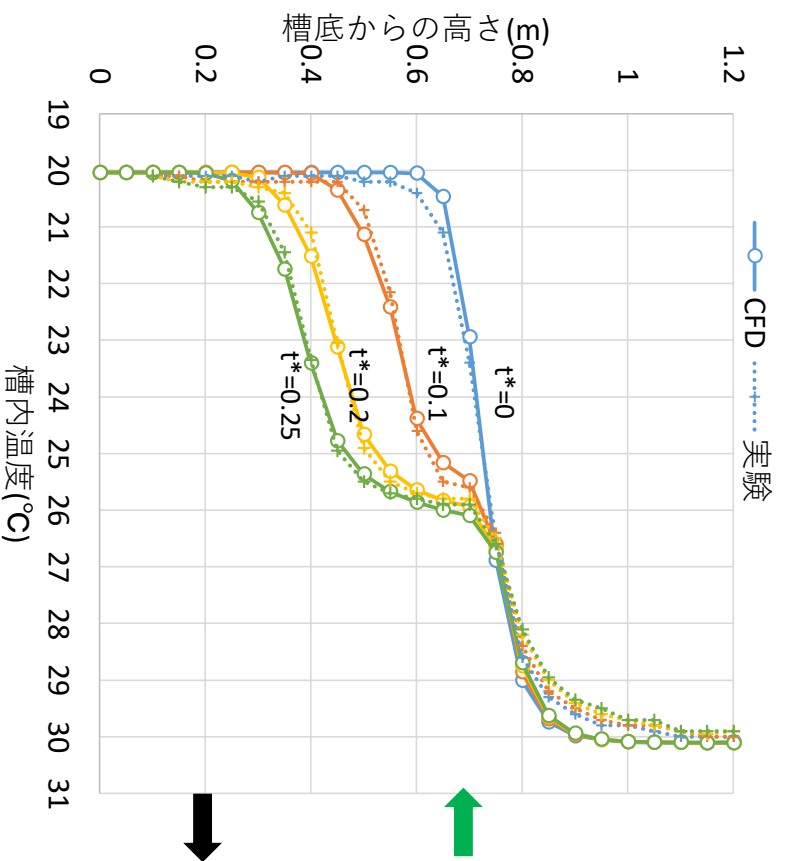


図 3.9 Case C1

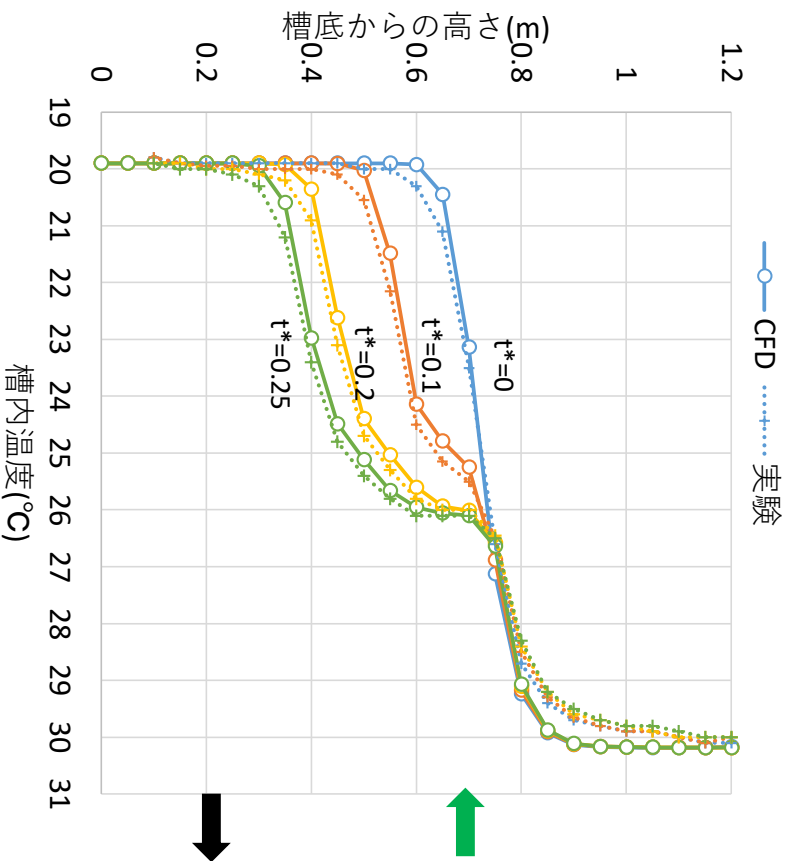


図 3.10 Case C2

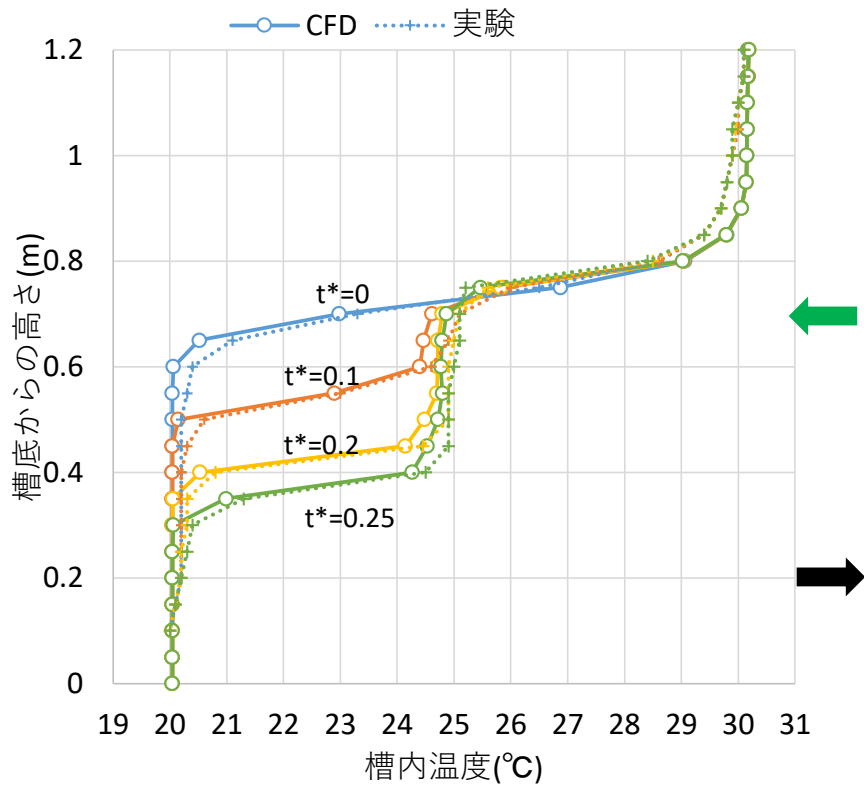


図 3.11 Case C3

3.4 第 3 章まとめ

第 3 章では鉛直方向に複数の流入出口を設けることで、複数温度帯での蓄熱を可能とした温度成層型蓄熱槽を対象とし、蓄熱槽性能の把握のための実験を行い、CFD 解析と比較して槽内温度についての計算精度の検証を行った。実験において、複数の温度帯について安定した温度成層ができ、また、複数の温度帯の蓄熱が可能であることが明らかとなった。そして、CFD 解析によって十分な精度で槽内温度を予測できることが分かった。

第 4 章

複数温度帯の蓄熱に対応した蓄熱槽の CFD に よる数値実験

4.1 はじめに

前章で槽内温度を CFD 解析により十分な精度で予測できることが明らかとなった。本章では、温度成層化した蓄熱槽内の混合性状への流入位置等の流入条件の影響について CFD 解析を用いて検証を行った。

4.2 解析対象

図 4.1 に解析対象図を示す。蓄熱槽には円盤型ディフューザーを使用した。計算負荷軽減のために、軸対称性を考慮して、円筒座標系の 2 次元 (r - z) の非定常解析を行った。流出位置は固定し、流入側のディフューザー設置高さを変化させて解析を行った。解析空間毎の槽容量、水深、槽直径、流入口直径、流入口円盤間隔、流入流量、入口アルキメデス数を表 4.1 に示す。

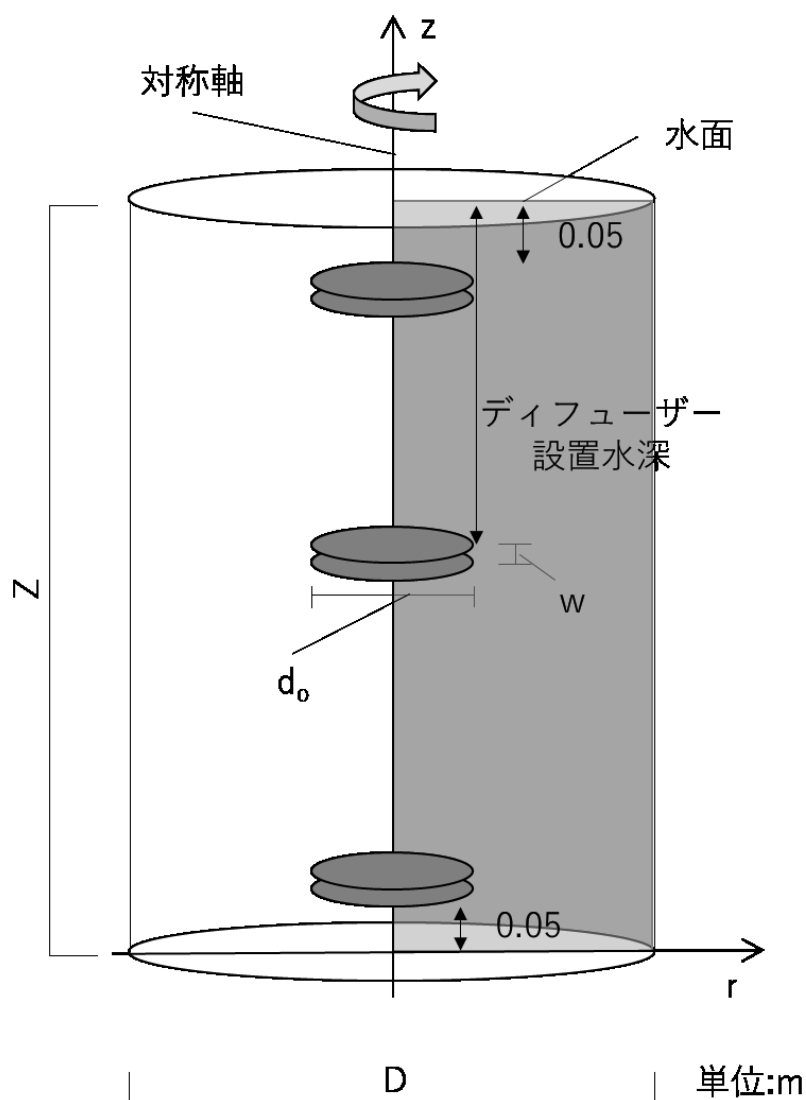


図 4.1 解析対象図

表 4.1 各解析空間の基本条件

解析空間	槽容積 [m ³]	槽水深 Z[m]	槽直径 D[m]	流入口 直径 do[m]	流入口 円盤間隔 w[m]	流入流量 [m ³ /h]	Arin (7-10°C)	Arin (7-12°C)	
1	9	3	1.954	0.6	0.03	0.9		6.095	
2						1.8	1.524		
3				0.35	0.015	0.9		0.259	
4						1.8	0.032		
5	25	3	3.257	0.9	0.045	2.5		5.998	
6						5	1.500		
7				0.5	0.025	2.5		0.317	
8						5	0.040		
9		5	2.523		0.9	0.045	2.5		5.998
10							5	1.500	
11					0.5	0.025	2.5		0.317
12							5	0.040	
13	100	3	6.515	1.6	0.08	10		6.657	
14						20	1.664		
15				0.9	0.04	10		0.263	
16						20	0.033		
17		5	3.568		1.6	0.08	10		6.657
18							20	1.664	
19					0.9	0.04	10		0.263
20							20	0.033	

4.3 計算条件

図 4.2、図 4.3 に解析空間 1 の場合の流入出条件を示す。図中には各流入条件における流入口中心高さを示した。以下にそれぞれの流入出条件、流入位置の詳細を示す。

図 4.2 の流入出条件 A は、一様の初期温度の下部流出・上部高温流入するものである。流入位置①は、水面から円盤上部の距離が 50mm、流入位置②は、水面と流入口の中央高さの槽水深に対する割合が 0.2 倍、流入位置③は、水面と流入口の中央高さの槽水深に対する割合が 0.5 倍である。

図 4.3 の流入出条件 B は、槽中央に温度成層がある温度分布を初期条件として下部及び上部から流出し中央に流入するものである。流入位置④は、槽の中央高さから水深の 0.2 倍上、流入位置⑤は、槽の中央高さから水深の 0.1 倍上、流入位置⑥は、槽の中央高さからと同じ、流入位置⑦は、槽の中央高さから水深の 0.1 倍下、流入位置⑧は、槽の中央高さから水深の 0.2 倍下である。

本章の数値実験における CFD 解析条件を表 4.2 に示す。また、CFD 解析による槽内鉛直温度分布は槽底部から水面までを鉛直方向に 50 分割し算出している。

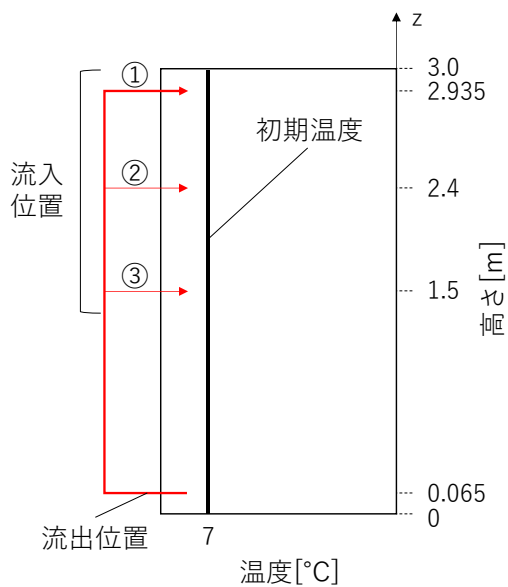


図 4.2 流入出条件 A

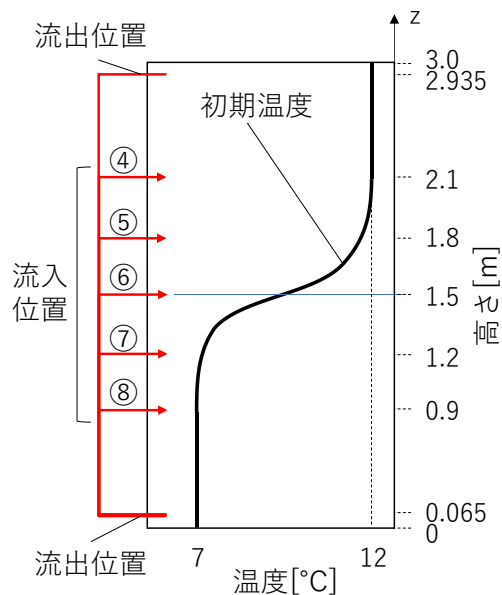


図 4.3 流入出条件 B

表 4.2 数値実験における CFD 解析条件

解析ソフト	STREAM ver.2020 SP1			
計算モデル	RNG k- ϵ モデル			
計算アルゴリズム	非定常 (SIMPLE)			
移流項	QUICK			
総メッシュ数	Case1	Case2	Case3	Case4
	118,800	123,872	120,384	120,384
	Case5	Case6	Case7	Case8
	198,534	198,534	203,750	203,750
	Case9	Case10	Case11	Case12
254,000	254,000	254,000	254,000	
Case13	Case14	Case15	Case16	
391,200	391,200	390,600	390,600	
Case17	Case18	Case19	Case20	
506,000	506,000	506,000	506,000	
水密度	多項式近似 (4次)			
計算時間間隔	0.5s			
境界条件	流入口	流量規定		
	流出口	自然流出および流量規定		
	槽壁	No slip、断熱		
	水面	Free slip		

4.4 計算結果

4.4.1 流入位置による比較

解析空間 1 での Case 毎の計算条件を表 4.3 に示す。図 4.4 に初期温度 7°C 一様の槽底部から取水し、12°C の高温流入がある場合の槽内温度分布を示す。図には、流入位置が槽底部から 2.935m (Case A1)、2.40m (Case A2)、1.50m (Case A3) の 3 条件の換水回数 (t^*) 0.1 と 0.5 の結果を示している。流入位置の異なる Case A1~A3 の結果から、一様温度の槽に高温流入がある場合は、槽のできるだけ上部に流入させることで、温度成層の上部の温度が早く上昇し、温度勾配の大きい温度成層が形成され、混合を抑制できることがわかる。

次に、槽上部温度が 12°C、下部が 7°C であり、中央高さ (1.5 m) に温度成層がある条件を初期条件として、槽下部から取水し、流入温度 9.5°C で、Case B1~B5 の 5 つの異なる位置に流入した場合の槽内温度の計算結果を図 4.5~図 4.8 に示す。それぞれ、流入位置が初期温度成層の高さとなる Case B3 の結果をあわせて示した。

流入位置が初期の温度成層の上側にある図 4.5、図 4.6 に示した結果から、流入位置が初期温度成層の高さと一致する Case B3 と比較して、流出口側に移動する温度成層部の温度勾配は大きく、進行が若干早くなることがわかる。また、Case B3 の結果では、上下に形成される温度成層の間の領域の温度は流入温度の 9.5°C にほぼ等しいが、Case B1、B2 の結果は、流入水と温度成層直上の槽内水との混合のために、流入温度よりも 0.5°C 程度高い温度となり、高温 (12°C) の領域が減少し、中間温度の領域が拡大している。流入位置が初期の温度成層部から離れた Case B1 の方が、これらの傾向が顕著であった。

流入位置が初期の温度成層の流出側 (下側) にある図 4.7、図 4.8 の結果から、Case B3 の流入位置よりも流入位置が低い場合は、流出口側に移動する温度成層部の温度勾配は小さく、温度成層の進行が早くなることがわかる。また、初期の温度成層の上方の槽内水と流入水の混合が生じ、高温と中間温度との間の温度成層の位置が高くなることがわかる。これは、周囲よりも高温の流入水に働く浮力により、槽内で流入水の上向き流速が大きくなることが原因であると考えられる。また、流入位置が Case B3 よりも低い場合、上部と下部の 2 つの温度成層の間は、流入温度 (9.5°C) よりも若干低く、緩やかな勾配のある温度分布となる。流入位置が初期の温度成層部から離れた Case B5 の方が、これらの傾向が顕著であった。これらの結果から、流入温度と等しい槽内水温の位置から流入させることが理想的であるが、若干ずれた流入位置を選択しなければならない場合、流出側に近い流入位置を選択することで混合損失の少ない蓄放熱が可能であると考えられる。

そして、槽上部温度が 12°C、下部が 7°C であり、中央高さ (1.5 m) に温度成層がある条件を初期条件として、槽上部と槽下部から取水し、流入温度 9.5°C で、Case B6~B11 の 2 つの異なる位置に流入した場合の槽内温度の計算結果を、流出流量別に図 4.9~図 4.11 に示す。

図 4.9~図 4.11 から、Case B3 の結果と同様に、流入温度と等しい位置に流入する Case B7、B9、B11 の結果は、混合損失の少ない良好な蓄放熱となっている。水深の 1 割だけ高

い位置に流入する Case B6、B8、B10 の結果は、高温（12℃）の領域が減少し、中間温度の領域が拡大していることがわかる。

表 4.3 Case 毎の計算条件（解析空間 1）

case名	流入口 設置位置	流出流量 [m ³ /h]	初期温度 [°C]	流入温度 [°C]	Arin
caseA1	①		7.0	12.0	(7°C- 12°C) 6.095
caseA2	②				
caseA3	③				
caseB1	④	上部：0 下部：0.9	7.0-12.0	9.5	(7°C- 9.5°C) 2.403
caseB2	⑤				
caseB3	⑥				
caseB4	⑦				
caseB5	⑧				
caseB6	⑤	上部：	0.675		
caseB7	⑥	下部：0.45			
caseB8	⑤	上部：0.45			
caseB9	⑥	下部：0.45			
caseB10	⑤	上部：			
caseB11	⑥	0.225			

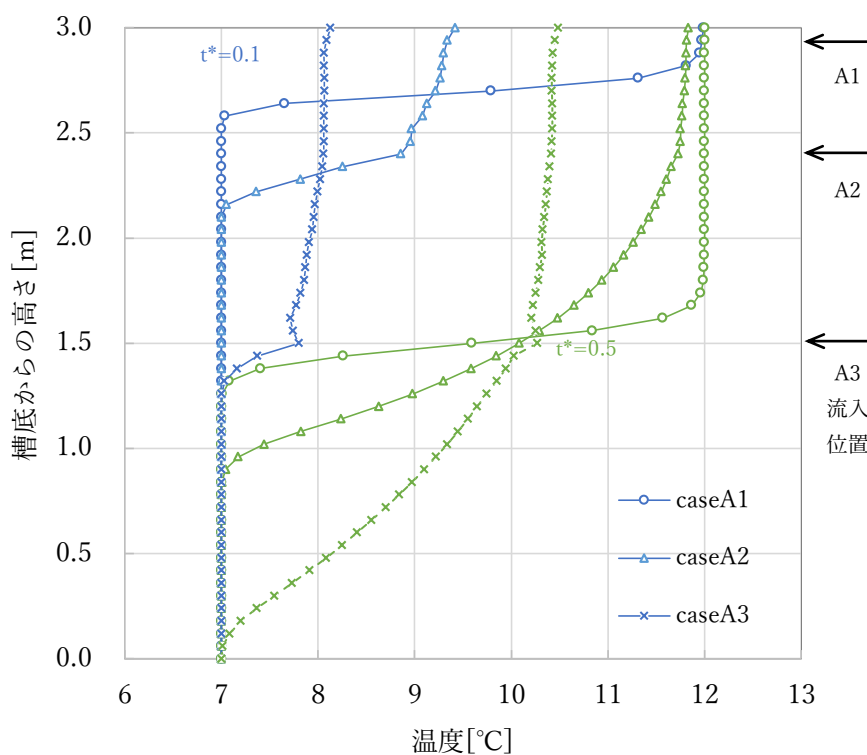


図 4.4 槽内温度分布（Case A1、A2、A3）

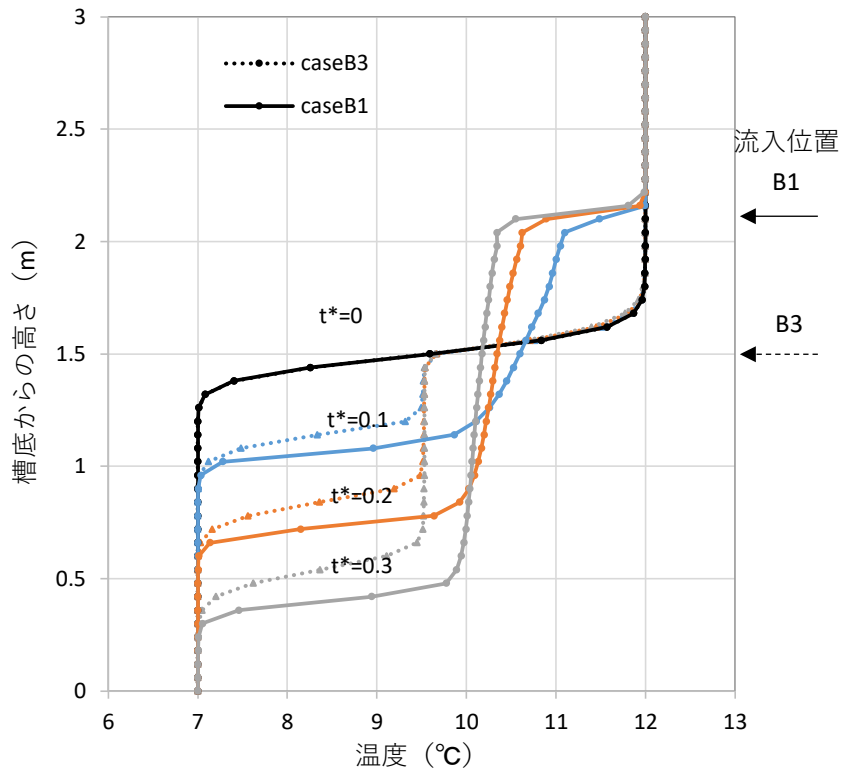


図 4.5 CaseB3 と Case B1 の比較

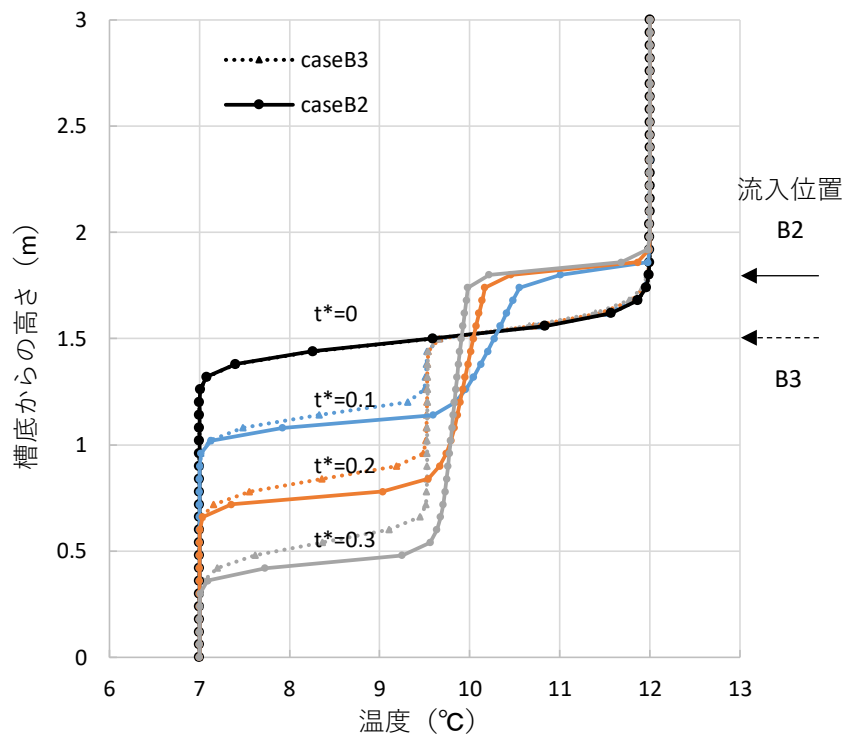


図 4.6 CaseB3 と CaseB2 の比較

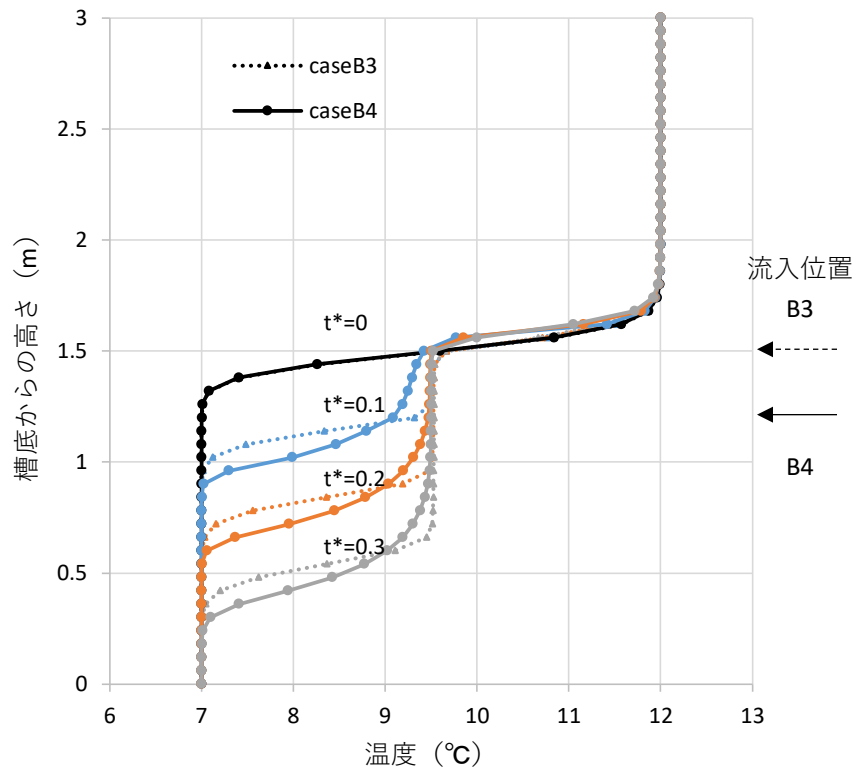


図 4.7 CaseB3 と CaseB4 の比較

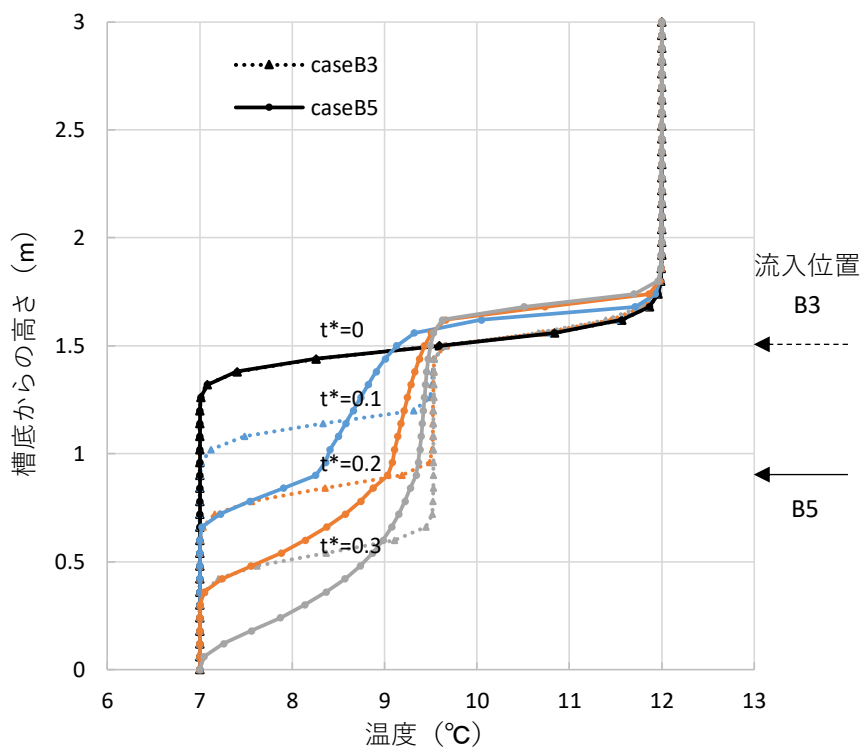


図 4.8 CaseB3 と CaseB5 の比較

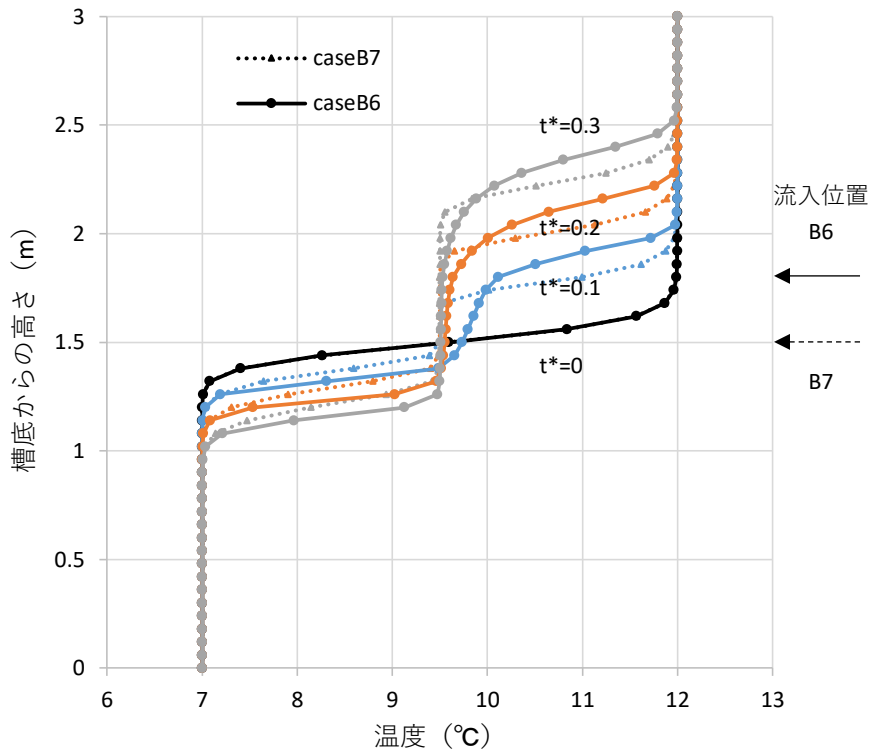


図 4.9 CaseB6 と CaseB7 の比較

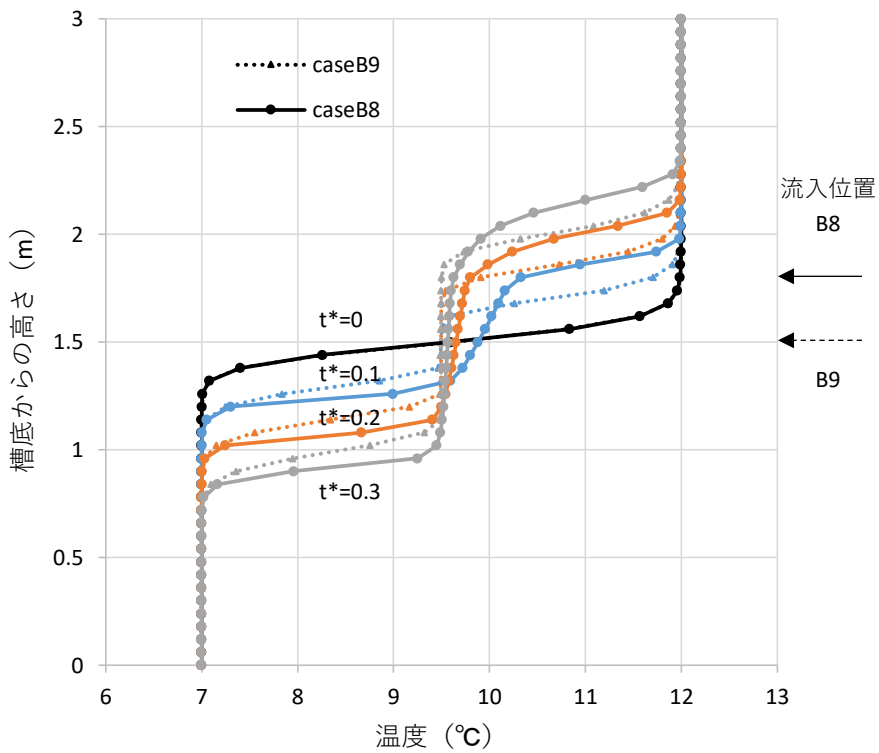


図 4.10 CaseB8 と CaseB9 の比較

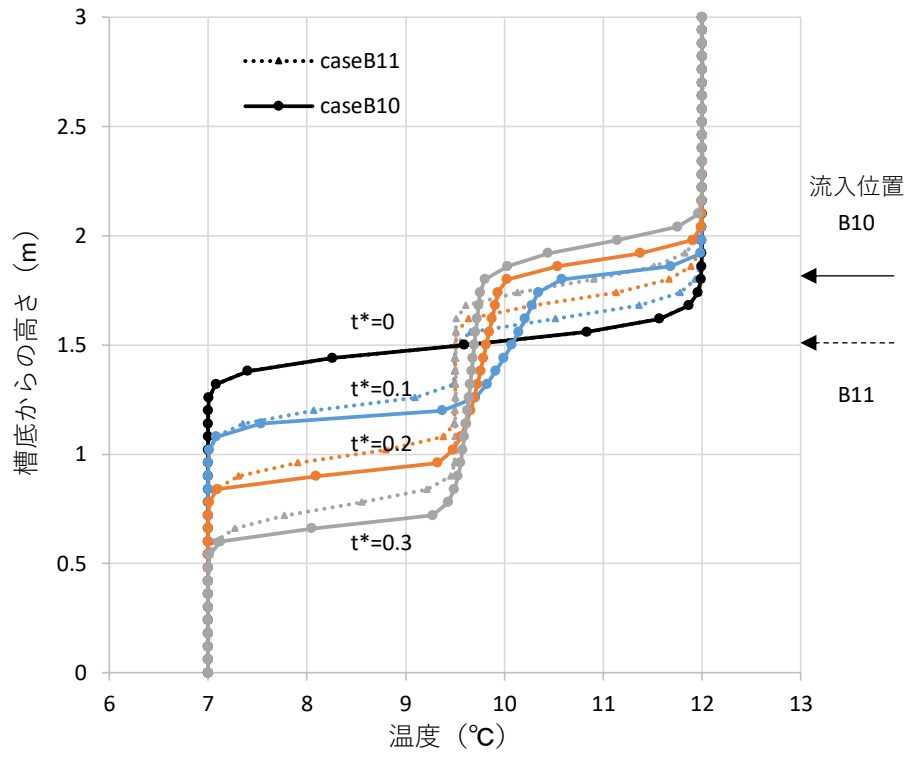


図 4.11 CaseB10 と CaseB11 の比較

4.4.2 流入口の形状の違いによる比較

図 4.12 に槽容量 9m^3 、槽水深 3m 、流量 $0.9\text{m}^3/\text{h}$ 、図 4.13 に槽容量 25m^3 、槽水深 3m 、流量 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 、図 4.14 に槽容量 25m^3 、槽水深 5m 、流量 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 、図 4.15 に槽容量 100m^3 、槽水深 3m 、流量 $10\text{m}^3/\text{h}$ 、図 4.16 に槽容量 100m^3 、槽水深 5m 、流量 $10\text{m}^3/\text{h}$ の場合の、槽上部温度が 12°C 、下部が 7°C であり、中央高さに温度成層がある条件を初期条件として、槽下部から取水し、流入温度 9.5°C で温度成層部に流入するとき (CaseB3) のディフューザーの流入口寸法のみが異なる計算の槽内温度分布の推移を合わせて示した。

ディフューザーの流入口寸法以外の条件が同様な計算の槽内温度分布の結果を比較しても、いずれの場合でも大きな差は見られないことがわかる。

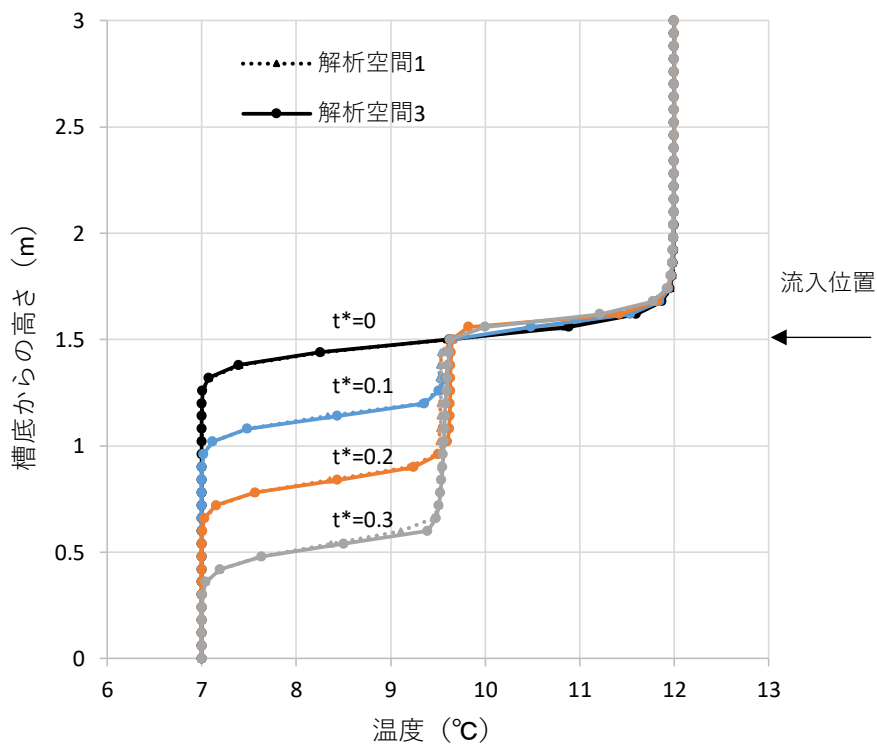


図 4.12 解析空間 1 と解析空間 3 の CaseB3 の比較

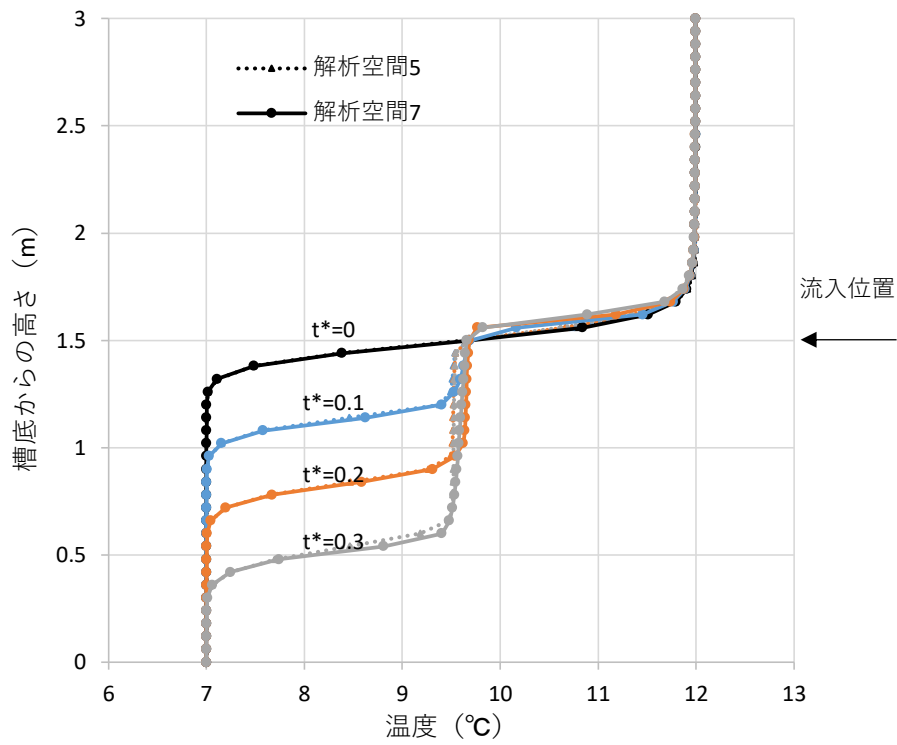


図 4.13 解析空間 5 と解析空間 7 の CaseB3 の比較

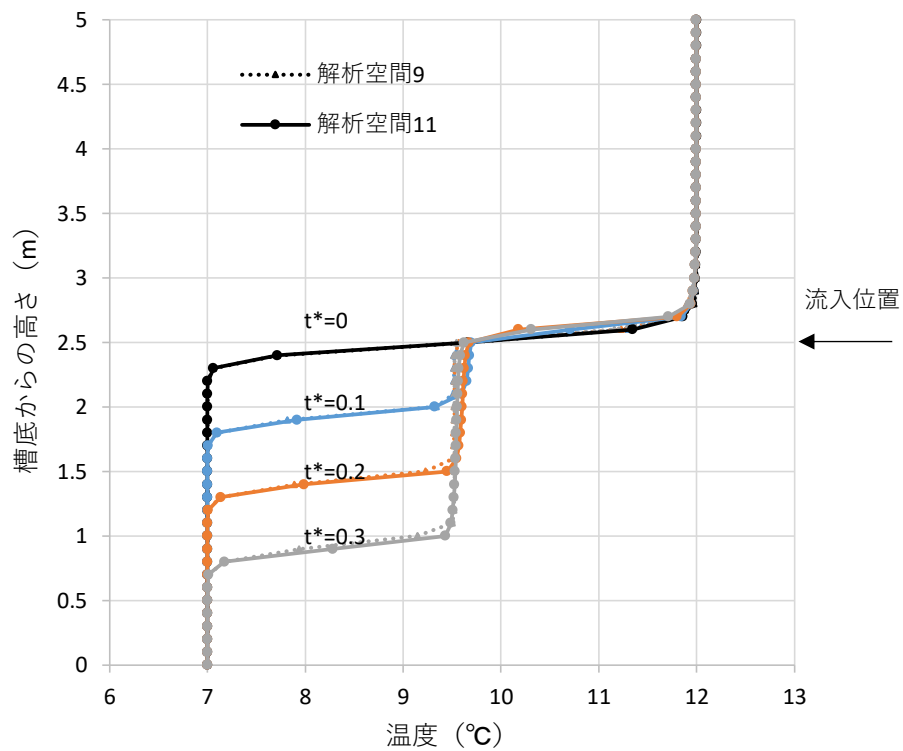


図 4.14 解析空間 9 と解析空間 11 の CaseB3 の比較

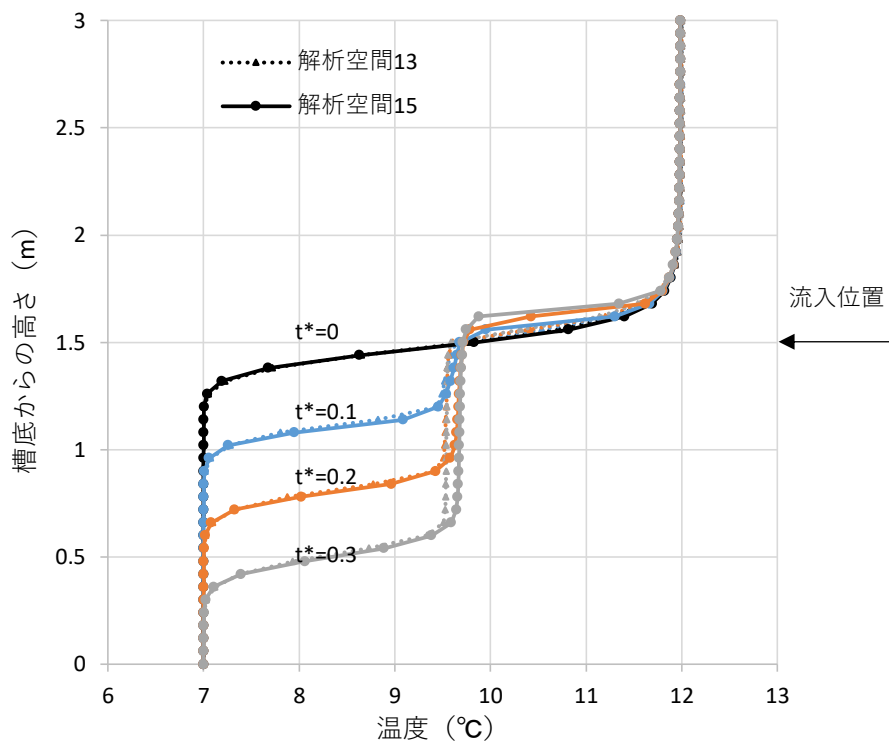


図 4.15 解析空間 13 と解析空間 15 の CaseB3 の比較

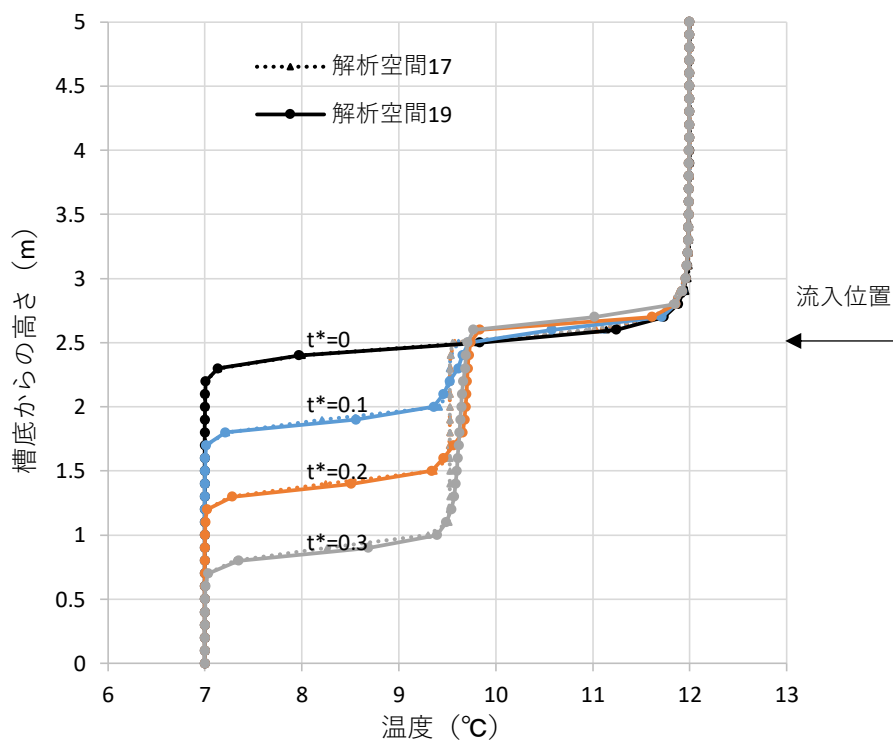


図 4.16 解析空間 17 と解析空間 19 の CaseB3 の比較

4.5 第4章まとめ

CFD 解析を用いて円盤型ディフューザーの設置条件や蓄熱槽の流入条件（流入流量、流入温度と初期温度）による槽内混合性状について検討した。その結果、以下に示す知見が得られた。

- 槽の中央高さに温度成層がある初期条件において、槽底部から取水し、流入位置が初期の温度成層の上側にある場合、流出口側に移動する温度成層部の温度勾配は大きく、進行が若干早くなる。また、上下に形成される温度成層の間の領域の温度は、流入水と温度成層直上の槽内水との混合のために、流入温度の 9.5°C よりも 0.5°C 程度高い温度となり、高温 (12°C) 領域が減少し、中間温度の領域が拡大する。
- 槽の中央高さに温度成層がある初期条件において、流入位置が初期の温度成層の下側にある場合、流入位置が低くても、初期の温度成層の上方の槽内水と流入水の混合が生じ、高温と中間温度との間の温度成層の位置が高くなる。これは、周囲よりも高温の流入水に働く浮力により、槽内で流入水の上向き流速が大きくなることが原因であると考えられる。
- 槽下部から流出する条件において、流入位置を槽内水と流入水の温度が等しい位置にできない場合、上方の位置よりも下方の位置（流出側の位置）に流入させることで、槽全体の混合損失を低減できることが示唆された。

第 5 章

任意の流入出位置に対応した温度成層型蓄熱槽 の槽内混合モデル

5.1 はじめに

本章では、任意の流入出位置に対応した温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデルの概要、CFD解析によるパラメータの同定概要、モデルパラメータの同定結果、槽内混合モデルの計算結果と CFD 解析による槽内温度分布の比較について示す。

5.2 槽内混合モデルの概要

本研究で用いる槽内混合モデルの概要を図 5.1 に示す。本モデルでは蓄熱槽の鉛直方向一次元の熱移動を考慮し、流入水が槽内水と混合する領域を混合域として、この混合域に流入水が分配されて水平方向には一様温度になるようにしている。混合域への流入水の分配については、流入位置、流速、温度差、流入口形状等によって、流入水と槽内水が混合する領域、大きさ、及び流入水の分布形を変化させることで、種々の条件下での槽内温度分布予測を可能とする。

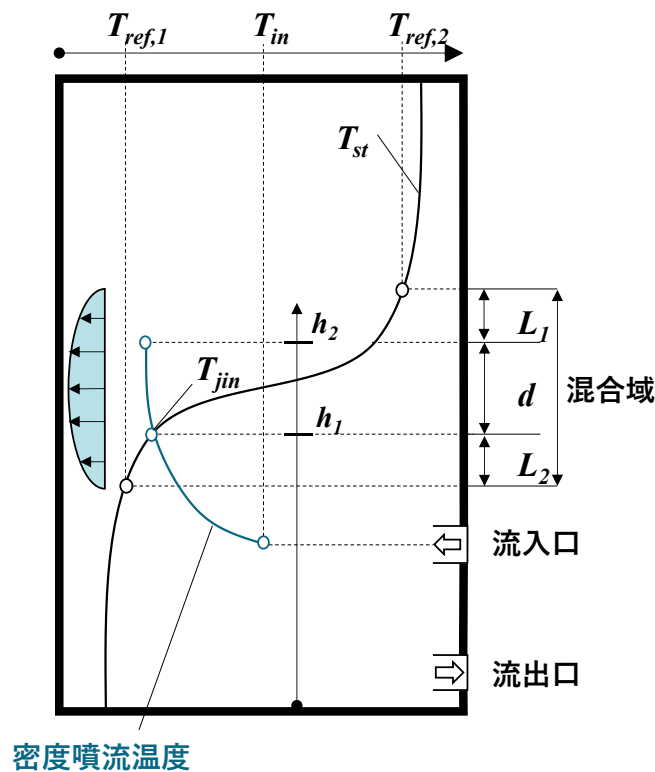


図 5.1 槽内混合モデルの概要

本モデルは、分割槽内の垂直方向の熱の拡散と移流、流入水と槽内水の混合を考慮した式(5.1)を基礎式としている。

$$\frac{\partial T_{st}}{\partial t} = \kappa_0 \frac{\partial^2 T_{st}}{\partial z^2} - U_{st} \frac{\partial T_{st}}{\partial z} + \frac{\Phi}{A_{st}} (T_{jin} - T_{st}) \quad (5.1)$$

ここで、

T_{jin} :密度噴流が h_1 に到達したときの温度, T_{st} :槽内温度, U_{st} :槽水平断面流速, κ_0 : 水の温度伝達率[m²/s] A_{st} :槽水平断面積, Φ :密度噴流から槽内に流入する鉛直方向単位長さ当たりの流量

混合域の範囲の決定方法を述べる。本研究で用いた円筒二次元密度噴流について図 5.2 に示す。図 5.2 に示したように流入位置から水平方向に槽内水よりも高温の流入がある場合、流入水は浮力を受ける密度噴流として、槽内水を連行して上昇し、槽内温度と温度が等しい位置 (h_1) に達する。この密度噴流の体積フラックス \dot{V} 、運動量フラックス \dot{M} 、連行係数 E 、ジェット中心速度 u_c 、ジェット半径 b 、は式(5.2)~式(5.6)であらわされる。4)

$$\dot{V} = 2 \pi^{3/2} r b u_c \quad (5.2)$$

$$\dot{M} = \sqrt{2} \pi^{3/2} r b u_c^2 \quad (5.3)$$

$$E = 4 \pi r \alpha u_c \quad (5.4)$$

$$u_c = \frac{\sqrt{2} \dot{M}}{\dot{V}} \quad (5.5)$$

$$b = \frac{\dot{V}}{2 \pi^{3/2} r u_c} = \frac{\dot{V}^2}{(2\pi)^{3/2} r \dot{M}} \quad (5.6)$$

槽内温度と温度が等しい位置 (h_1) に達した後、慣性力によって上昇するが、周囲水よりも密度が高いため減速し、最大上昇高さ (h_2) に達する。この高さ h_1 と h_2 の間で槽内水と流入水が混合すると考えられるが、この範囲を超えて乱流拡散の影響が生じる⁵⁾と考えられ、この影響を考慮して混合域を上方と下方に、それぞれの深さ L_1 、 L_2 だけ混合域を拡張することとした。

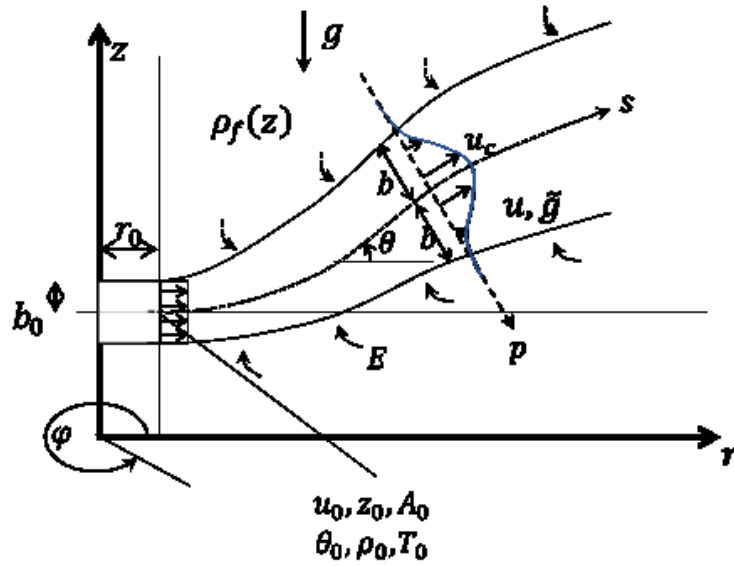


図 5.2 円筒二次元密度噴流

5.3 モデルパラメータの同定

5.3.1 CFD 解析によるパラメータ同定概要

槽内混合モデルの中で、混合域拡張深さ L_1 、 L_2 が未知のパラメータであるため、種々の入力条件下での CFD 解析から混合域深さを同定した。

5.3.2 モデルパラメータの同定結果

L_1 、 L_2 は、密度噴流の浮力が 0 となる高さ h_1 での平均流速 u_{in} と密度 ρ_m 、混合域端部の槽内水密度 $\rho_{ref,j}$ で定義されるアルキメデス数 (式(5.7)) を用いた式(5.8)から求められるとした。ここで、式中の係数 2.2 と -0.09 の値は、4 章の表 4.1 に示したすべての解析空間における CFD 解析結果を用いて、鉛直方向の槽内温度分布の 2 乗平均平方根誤差が最小となるように同定した。

$$Ar_{in,j} = gd \frac{(-1)^j (\rho_{ref,j} - \rho_{in})}{\rho_{ref,j}} \frac{1}{\bar{u}_{in}^2} \quad (j=1,2) \quad (5.7)$$

$$L_j = 2.2d Ar_{in,j}^{-0.09} \quad (j=1,2) \quad (5.8)$$

また、解析空間毎の二乗平均平方根誤差の結果を図 5.3 に示す。横軸は上から解析空間、入口アルキメデス数、槽水深、槽容量を表している。入口アルキメデス数が大きいほど二乗平均平方根誤差の値が小さくなること分かる。一方で、入口アルキメデス数が小さい条件では二乗平均平方根誤差が 0.10 を超えているものが大きい。これは流入位置が温度成層部より離れた位置から流入する計算条件の結果が影響していることが考えられる。

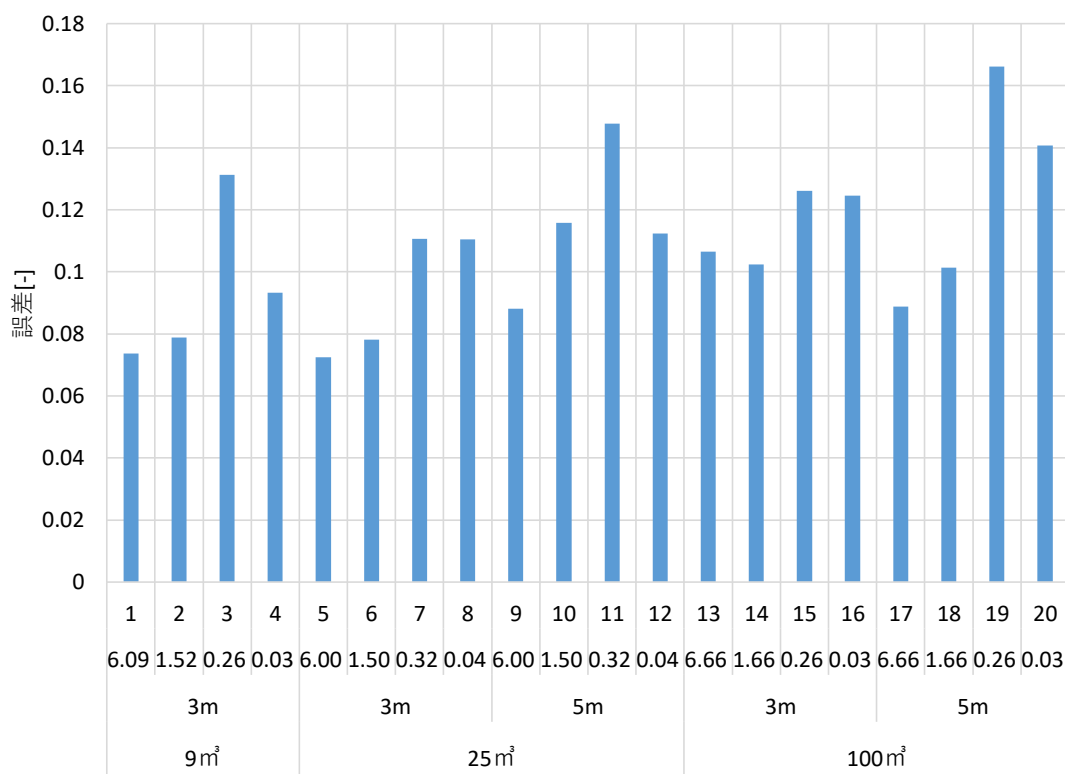


図 5.3 解析空間毎の二乗平均平方根誤差

5.4 槽内混合モデルの計算結果と CFD 解析結果の比較

図 5.2 に示した二乗平均平方根誤差の値が小さく、入口アルキメデス数の大きい条件の一例（解析空間 1）として、図 5.4～5.17 に、同定したモデルパラメータを用いた槽内混合モデルの槽内温度分布を CFD 解析による槽内温度分布と比較した。計算条件は 4 章の表 4.3 を用いている。

入口アルキメデス数の大きい場合、初期温度成層の高さと一致する流入条件では、槽内混合モデルの結果は CFD 解析の結果とよく一致していることがわかる。また、初期温度成層から離れた位置から流入する条件では、流出口側に移動する温度成層部の温度勾配は精度よく予測できていることが確認された。

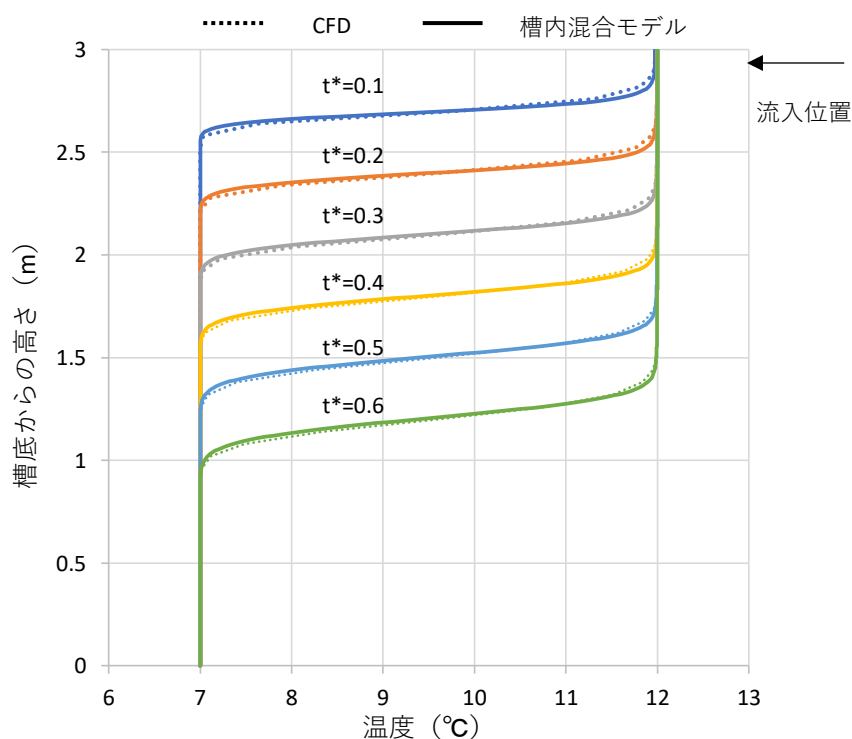


図 5.4 CaseA1 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較（解析空間 1）

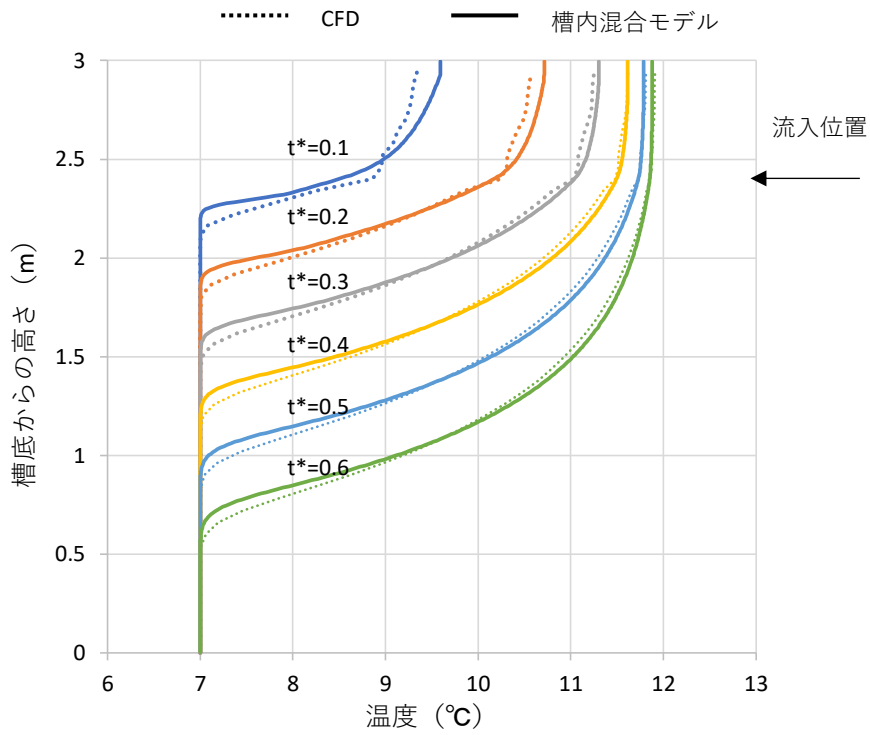


図 5.5 CaseA2 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

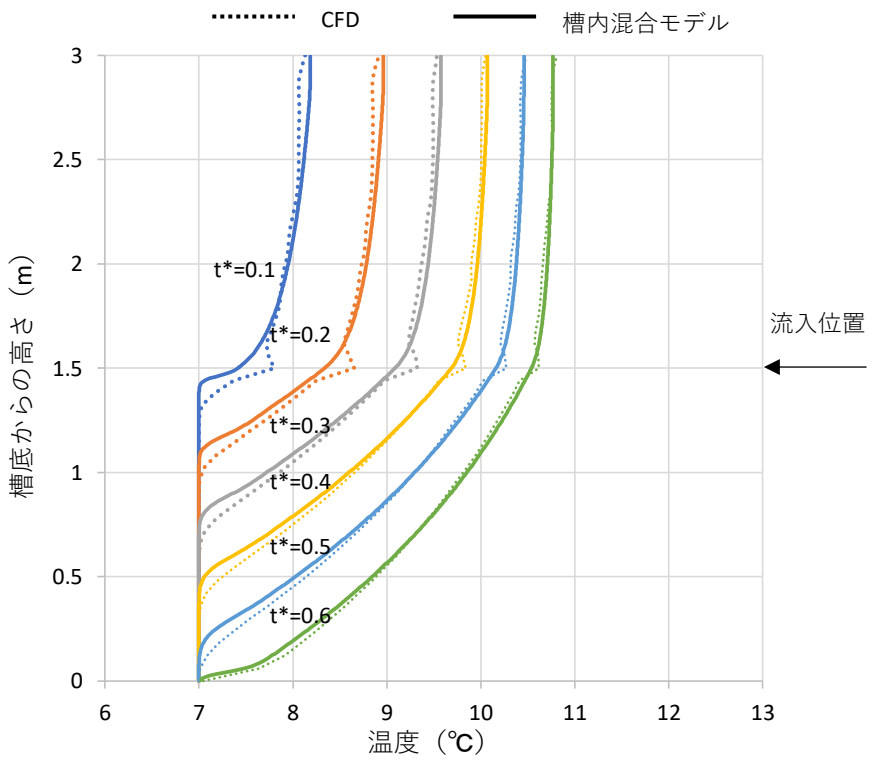


図 5.6 CaseA3 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

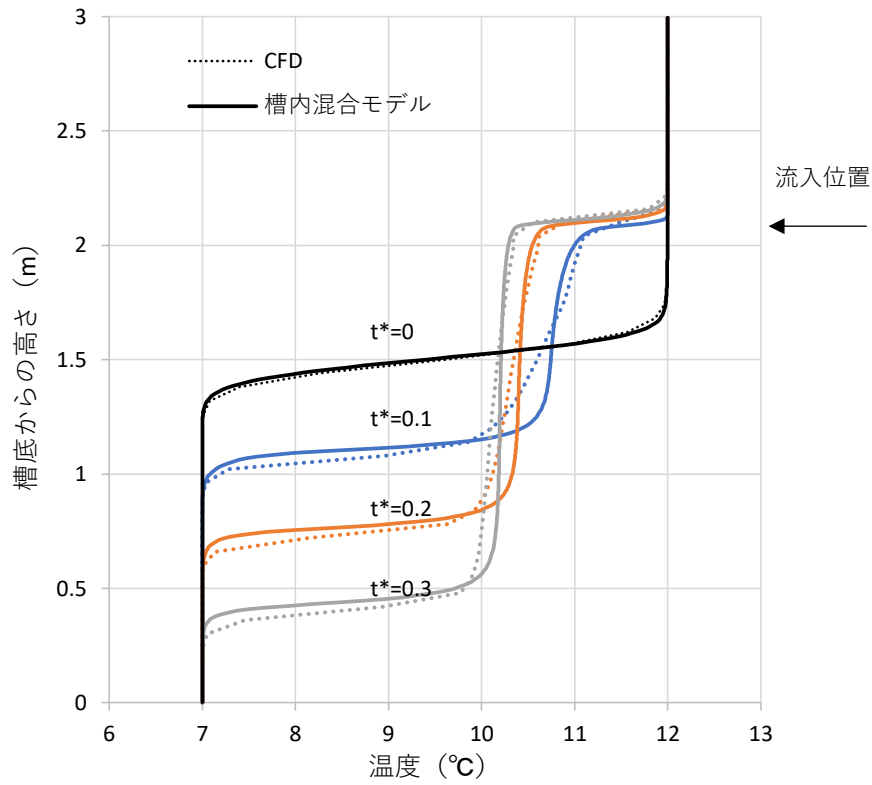


図 5.7 CaseB1 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

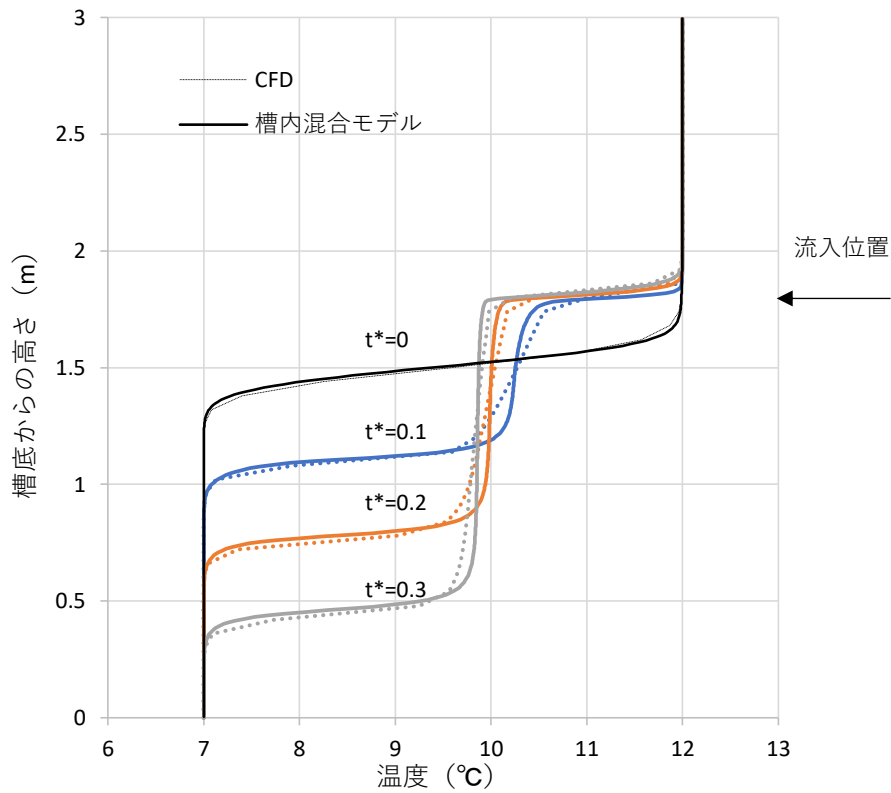


図 5.8 CaseB2 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

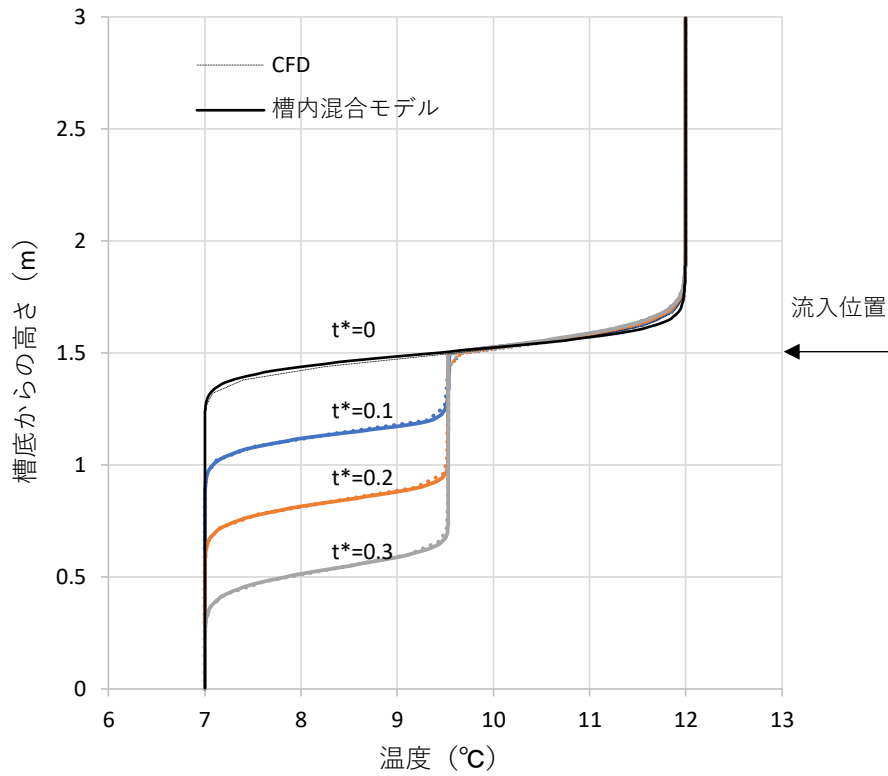


図 5.9 CaseB3 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

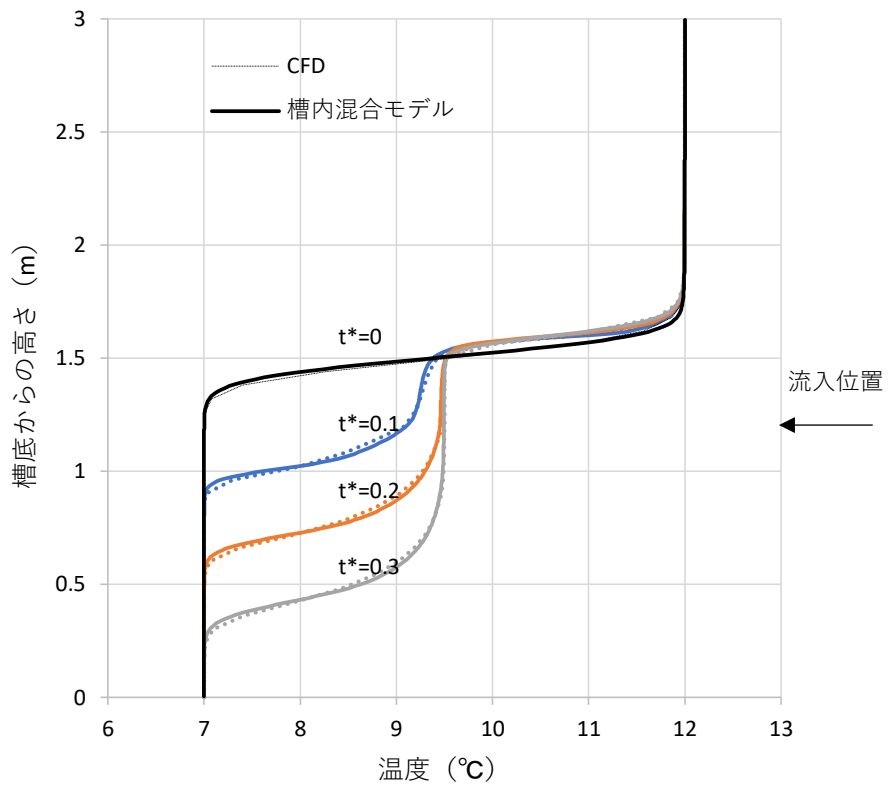


図 5.10 CaseB4 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

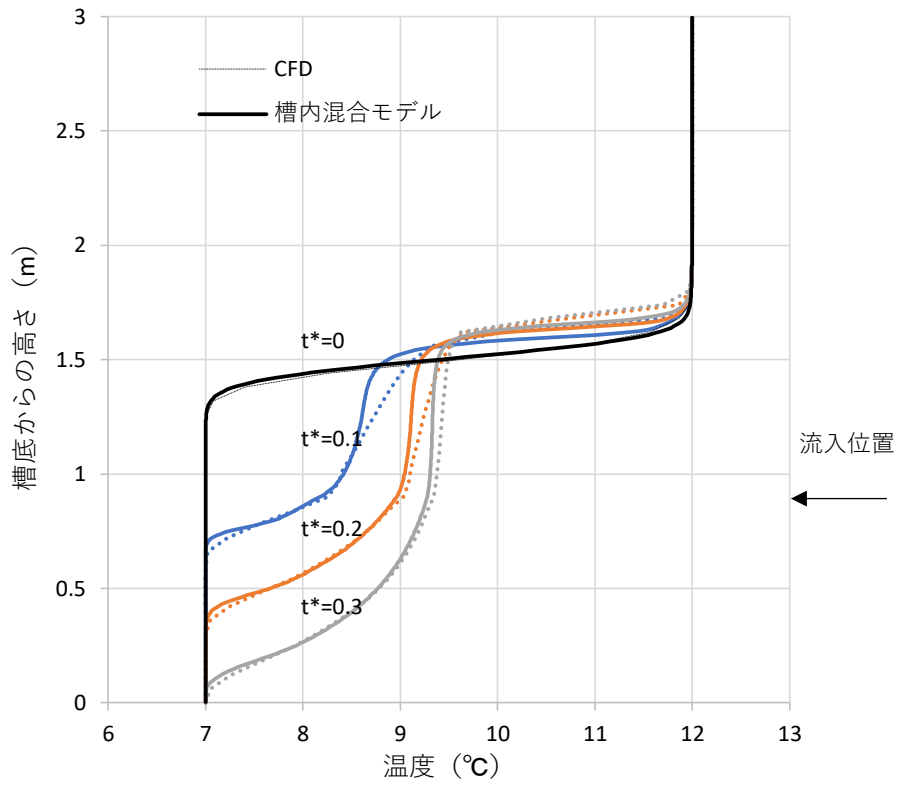


図 5.11 CaseB5 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

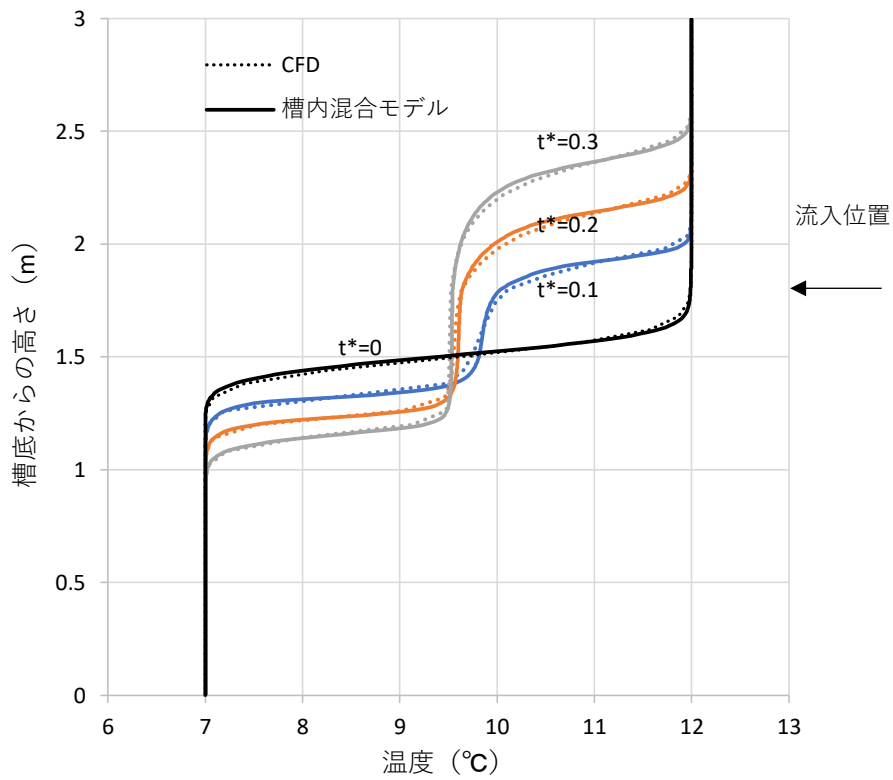


図 5.12 CaseB6 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

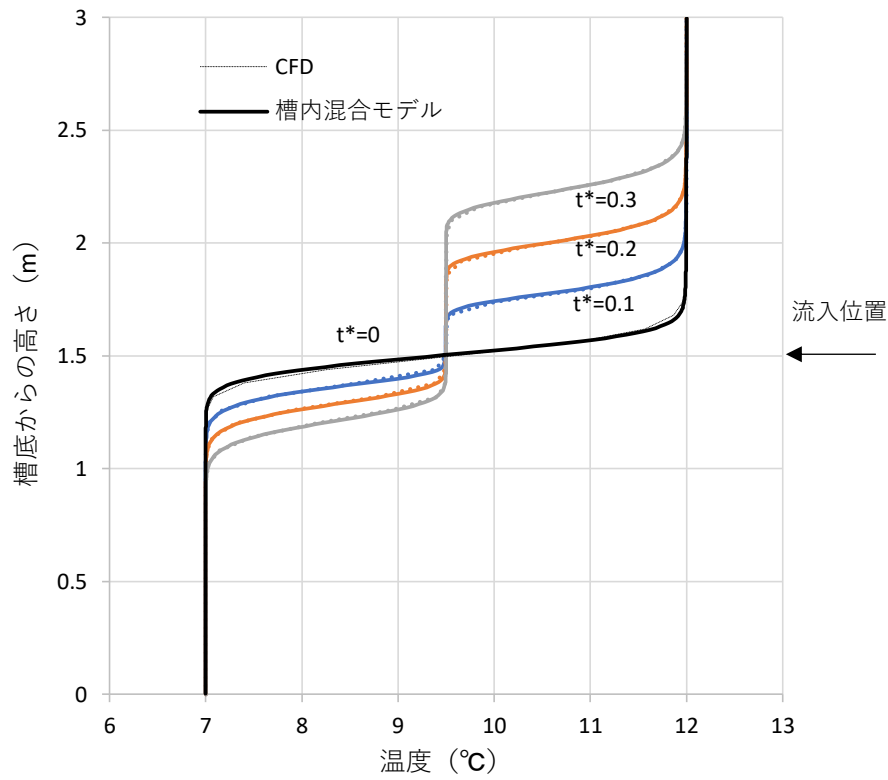


図 5.13 CaseB7 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

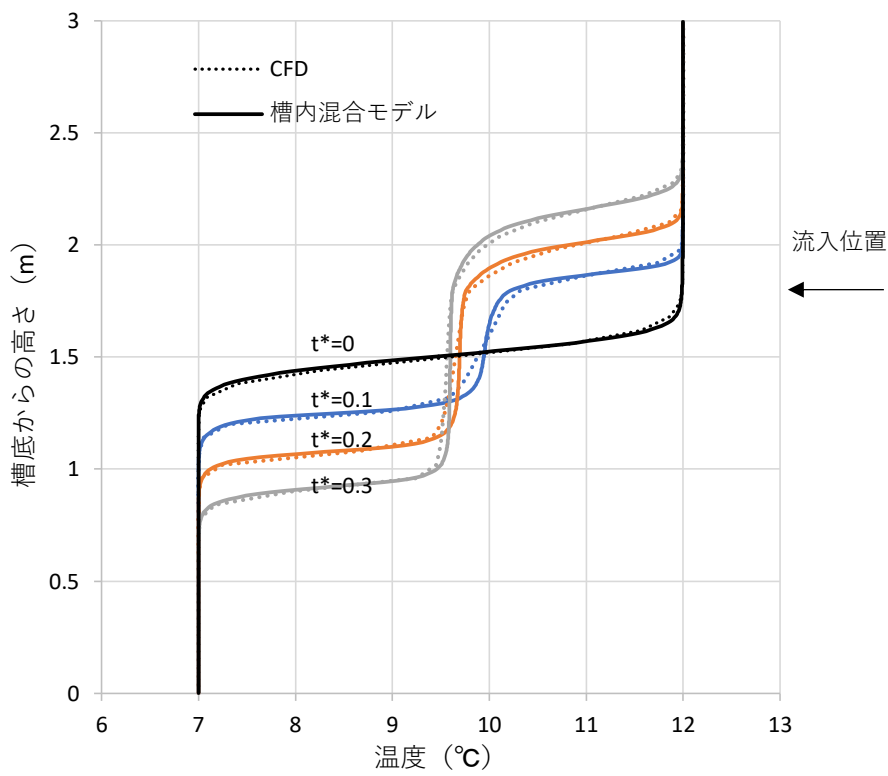


図 5.14 CaseB8 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

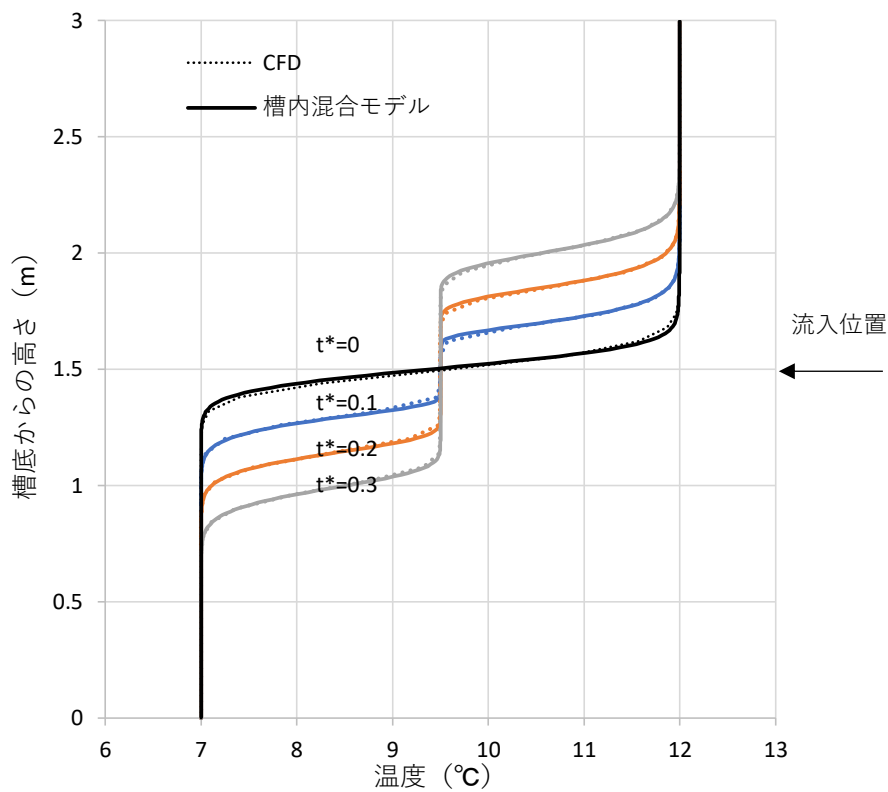


図 5.15 CaseB9 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

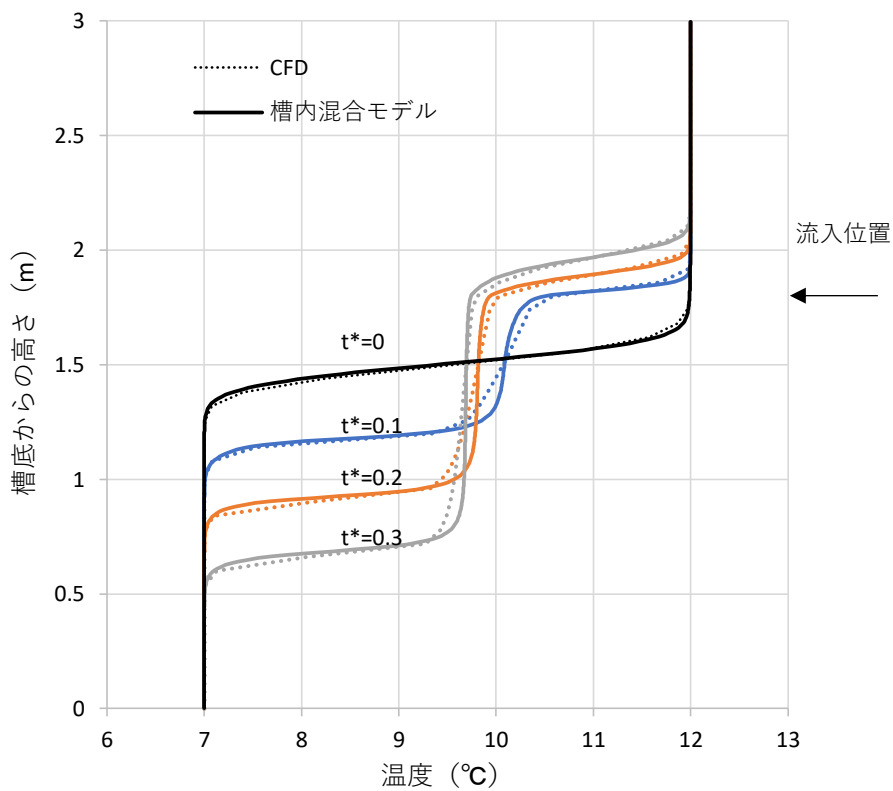


図 5.16 CaseB10 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

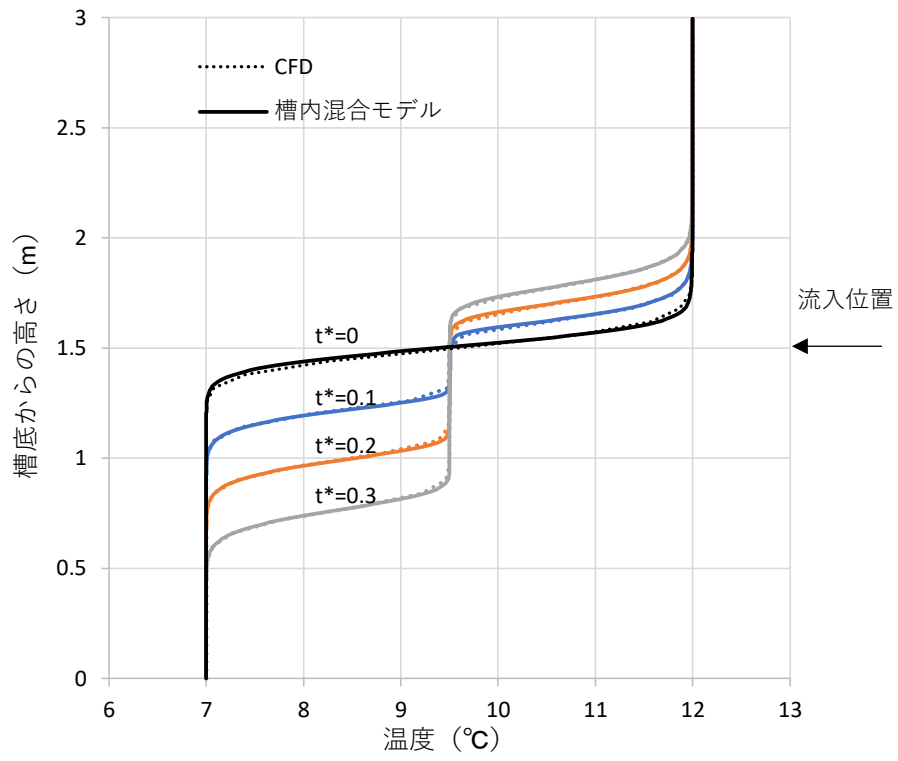


図 5.17 CaseB11 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 1)

次に、図 5.3 に示した二乗平均平方根誤差の値が大きく、入口アルキメデス数の小さい条件の一例（解析空間 19）として、図 5.18～5.31 に、同定したモデルパラメータを用いた槽内混合モデルの槽内温度分布を CFD 解析による槽内温度分布と比較した。計算条件を表 5.1 に示す。

入口アルキメデス数の小さい場合、流入位置が初期温度成層の高さと一致する流入条件では、入口アルキメデス数の大きい場合と同様に槽内混合モデルで CFD 解析の結果を精度よく予測できていることがわかる。一方で、初期温度成層から離れた位置から流入する条件では、CFD 解析と比較して流出口側に移動する温度成層部の温度勾配は小さく、温度成層の進行が早くなることがわかる。

表 5.1 解析空間 19 の計算条件

case名	流入口 設置位置	流出流量 [m ³ /h]	初期温度 [°C]	流入温度 [°C]	Arin
caseA1	①		7.0	12.0	(7°C- 12°C) 0.263
caseA2	②				
caseA3	③				
caseB1	④	上部：0 下部：10	7.0-12.0	9.5	(7°C- 9.5°C) 0.104
caseB2	⑤				
caseB3	⑥				
caseB4	⑦				
caseB5	⑧				
caseB6	⑤	上部：7.5			
caseB7	⑥	下部：2.5			
caseB8	⑤	上部：5.0			
caseB9	⑥	下部：5.0			
caseB10	⑤	上部：2.5			
caseB11	⑥	下部：7.5			

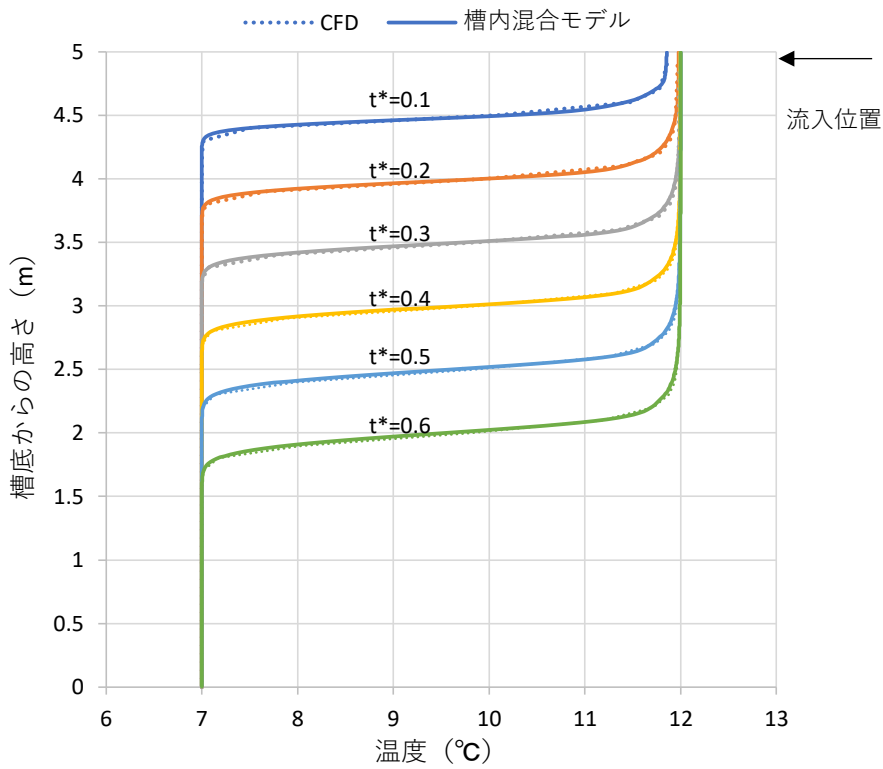


図 5.18 CaseA1 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

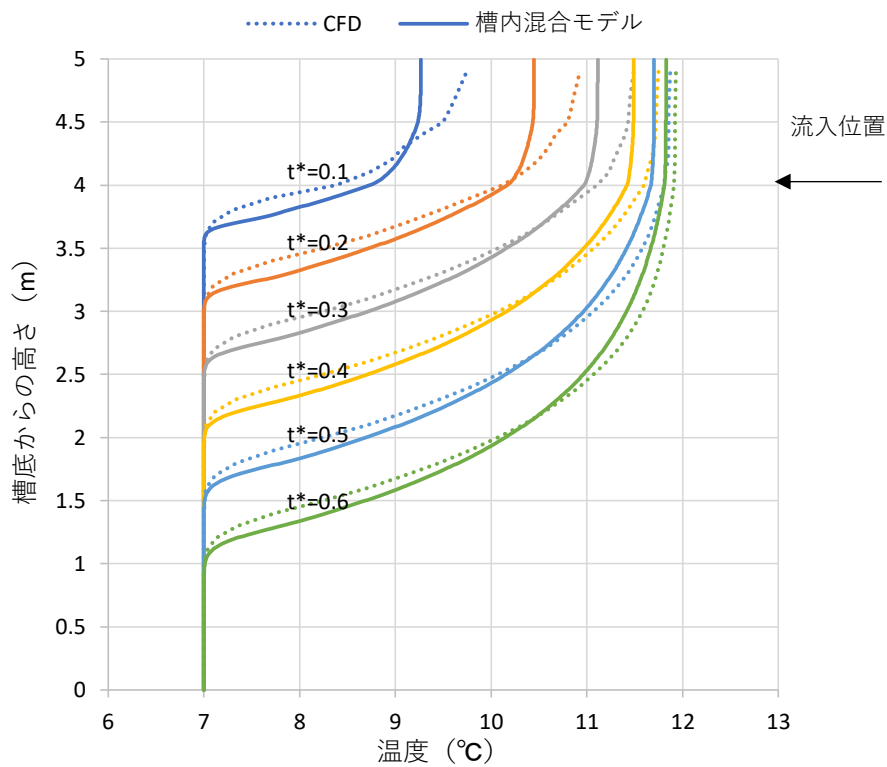


図 5.19 CaseA2 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

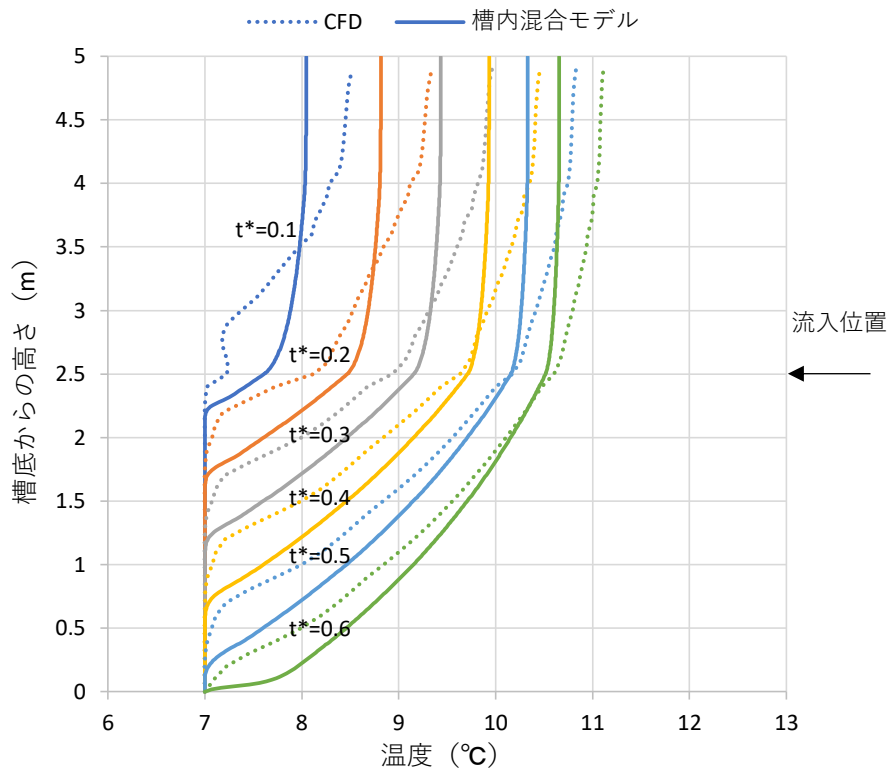


図 5.20 CaseA3 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

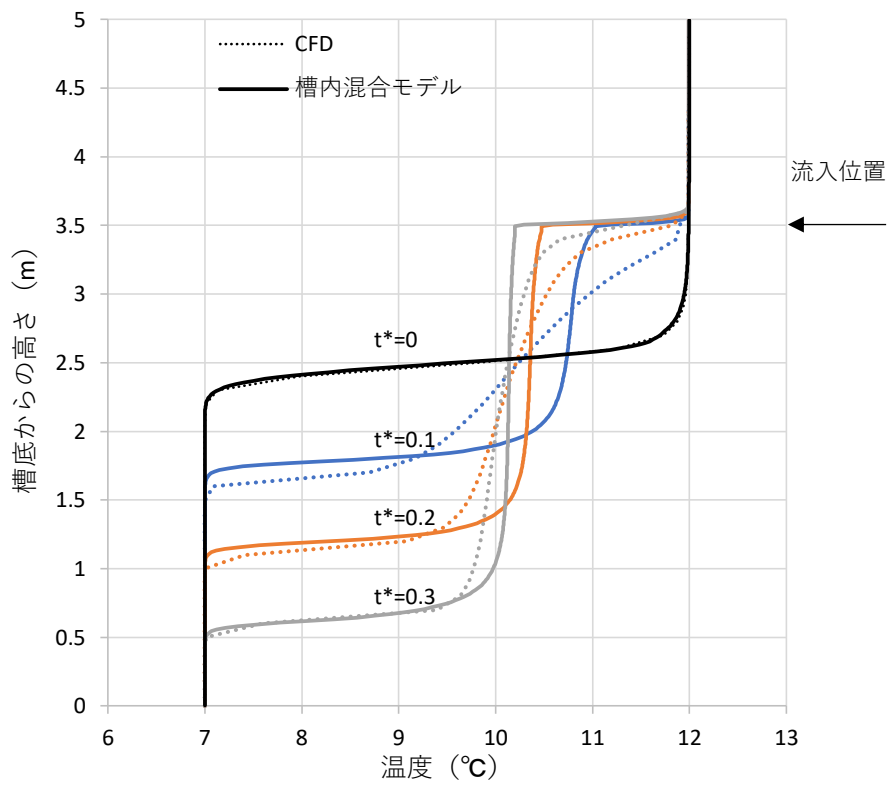


図 5.21 CaseB1 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

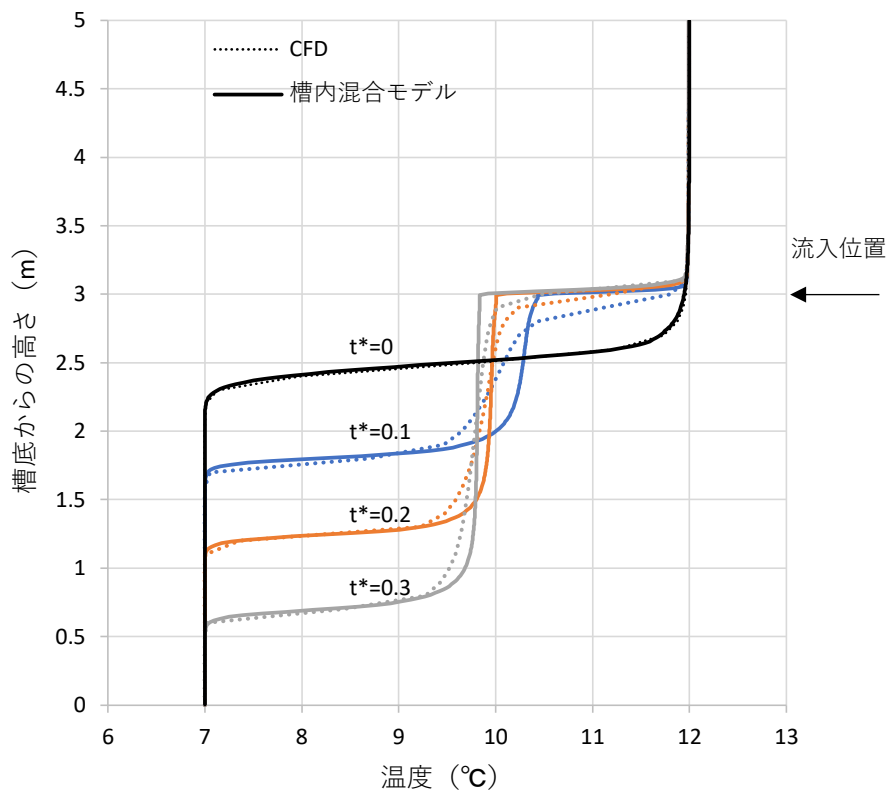


図 5.22 CaseB2 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

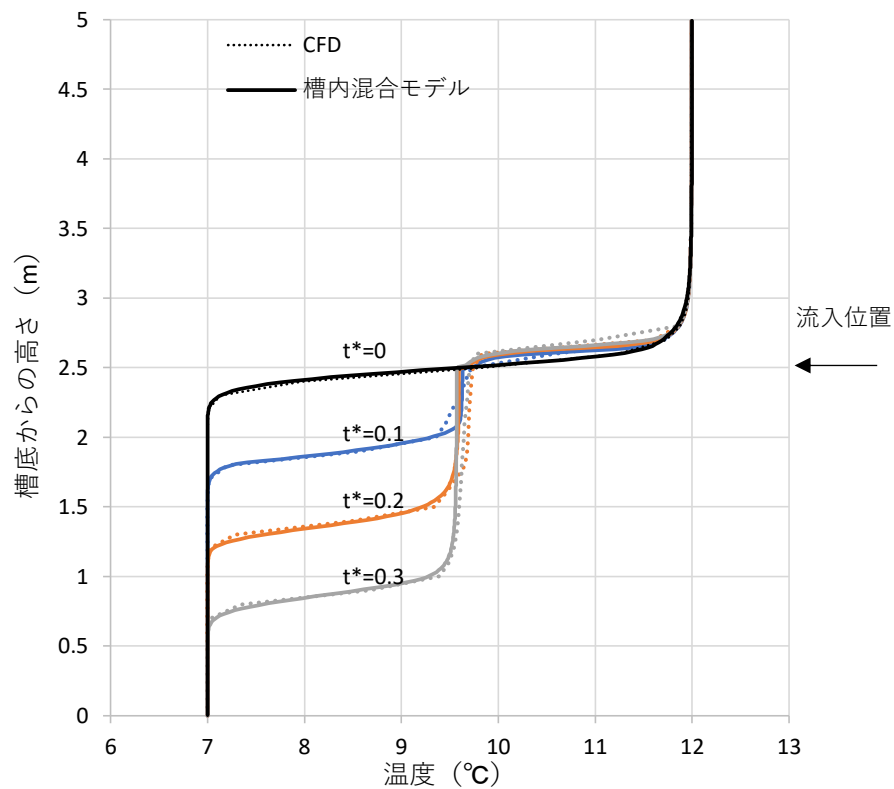


図 5.23 CaseB3 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

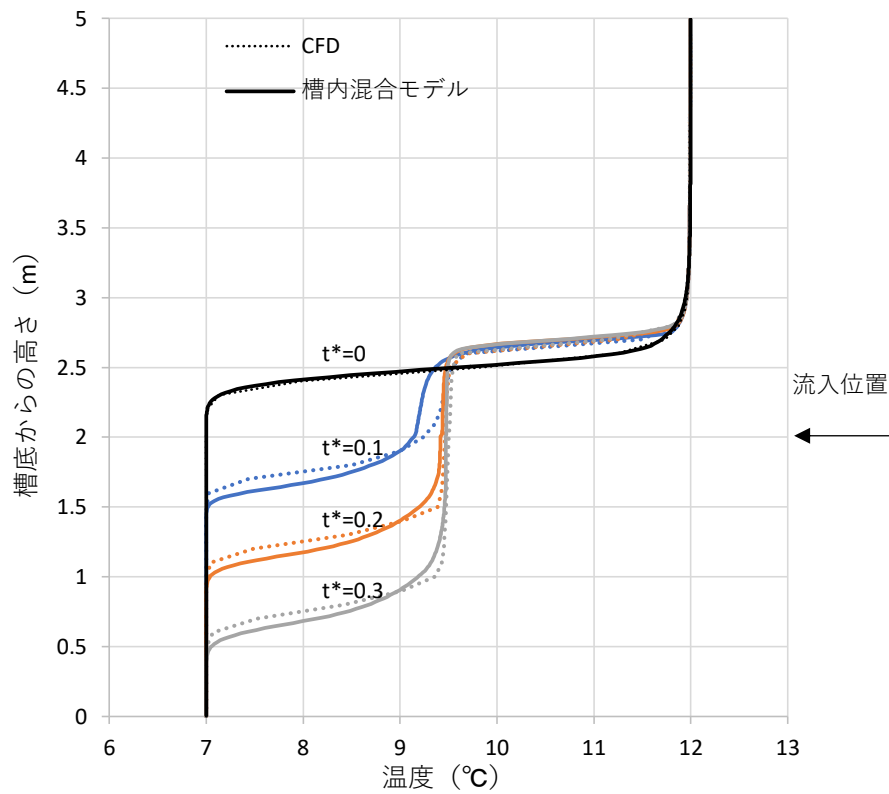


図 5.24 CaseB4 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

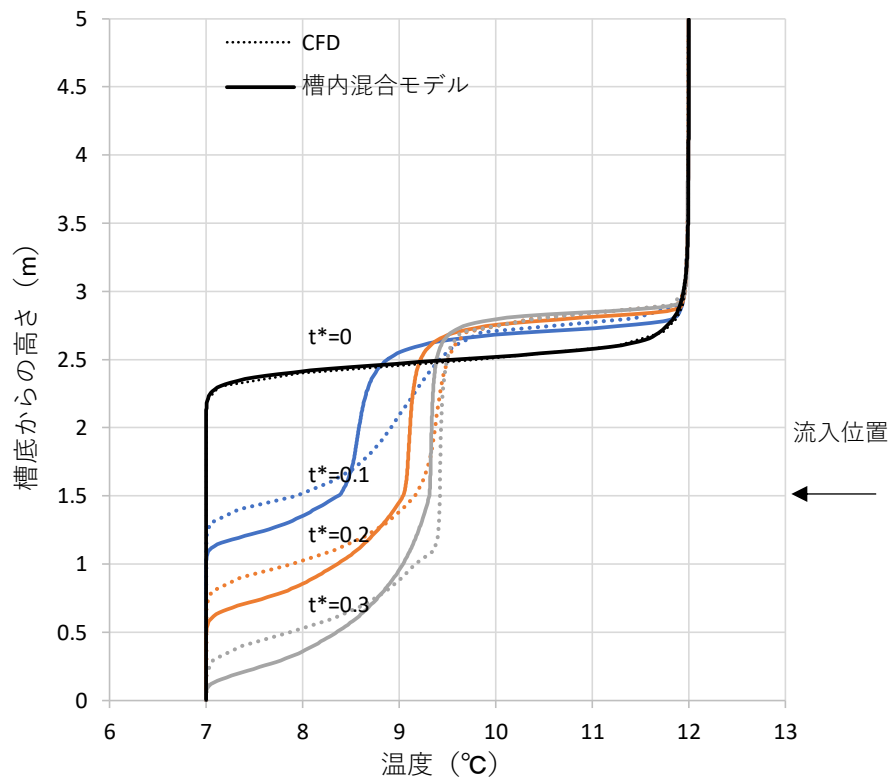


図 5.25 CaseB5 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

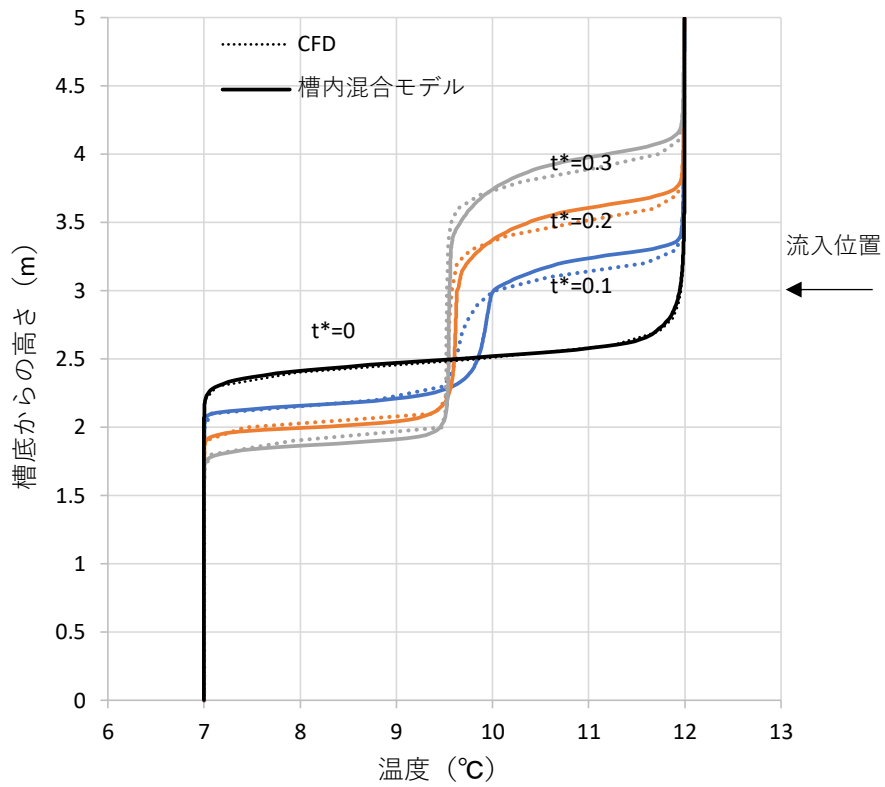


図 5.26 CaseB6 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

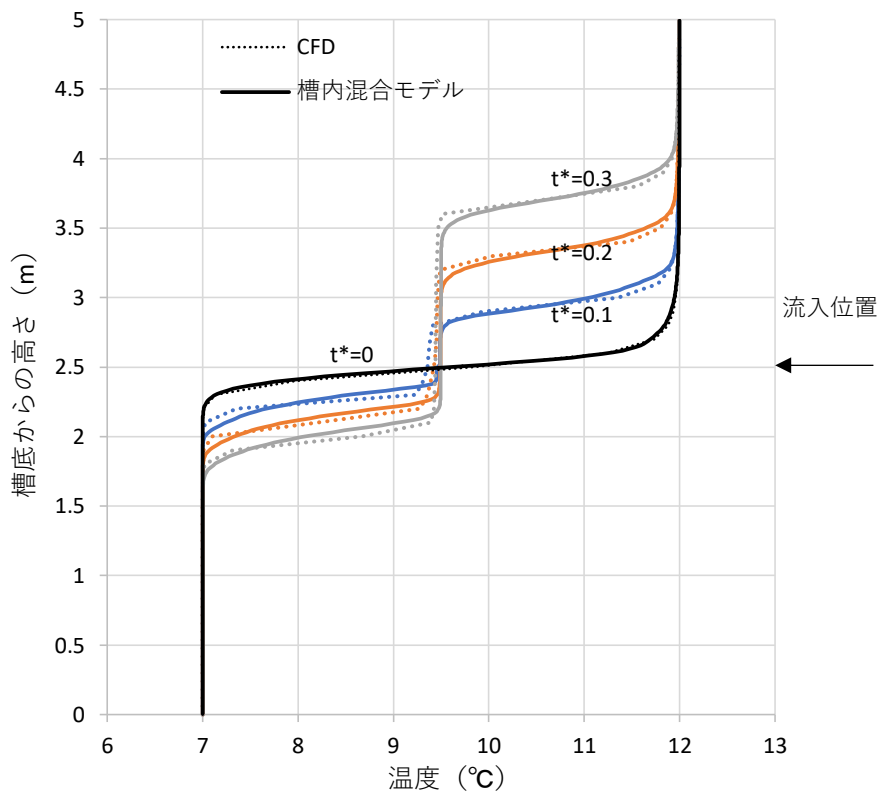


図 5.27 CaseB7 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

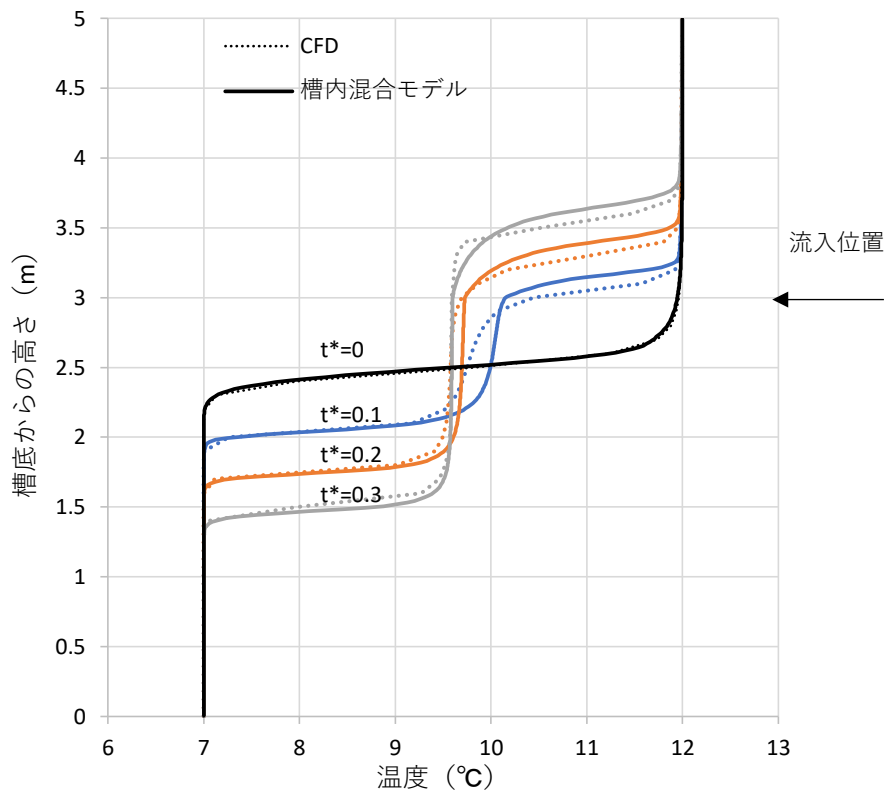


図 5.28 CaseB8 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

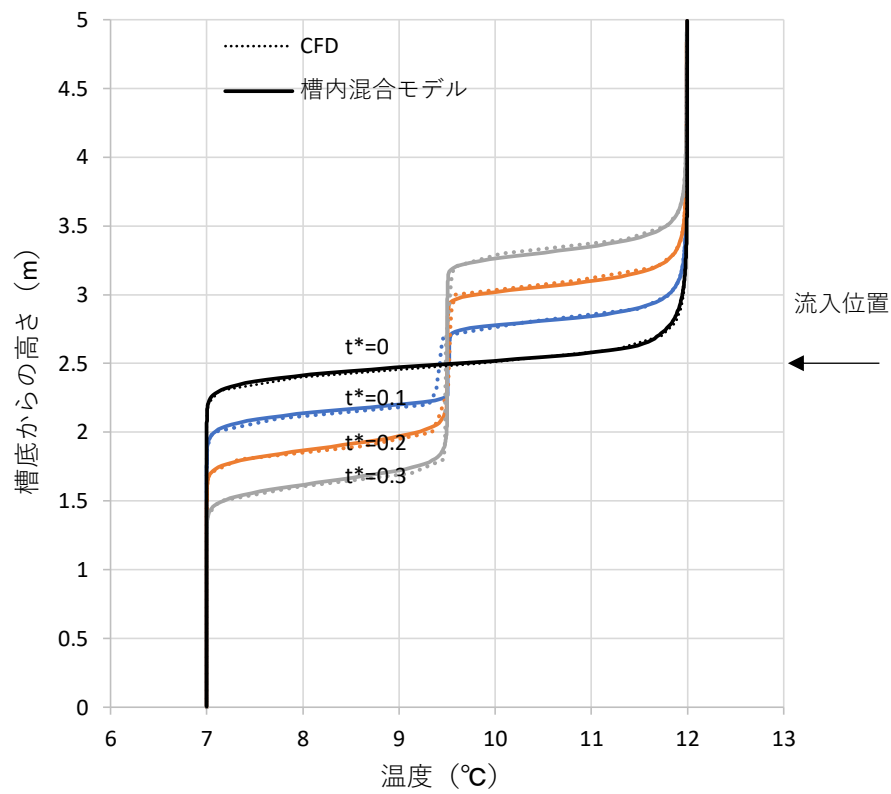


図 5.29 CaseB9 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

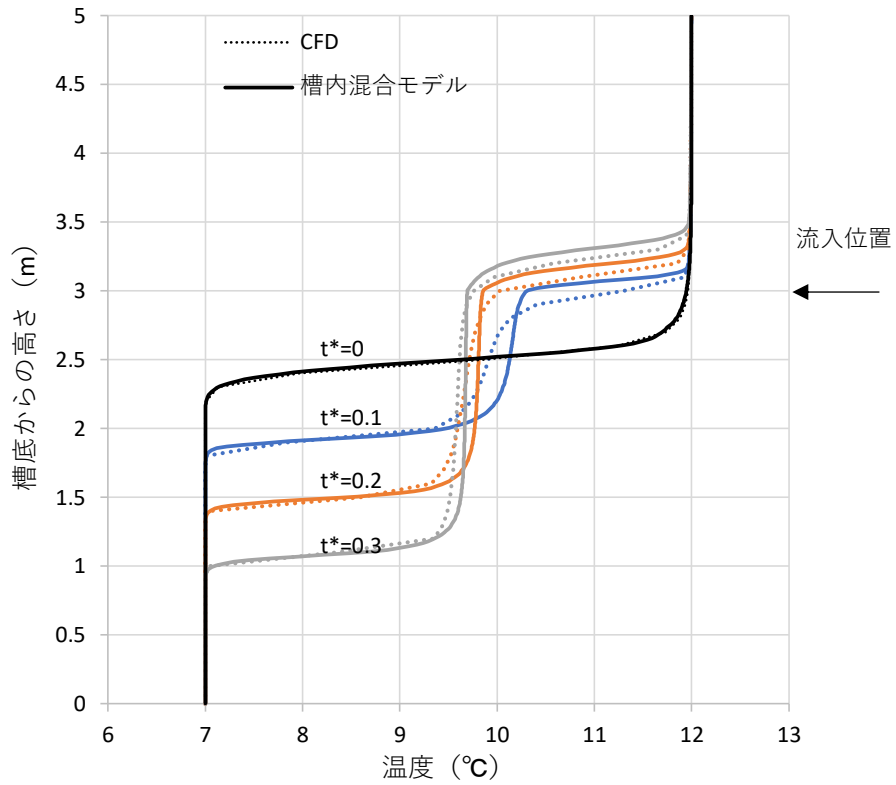


図 5.30 CaseB10 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

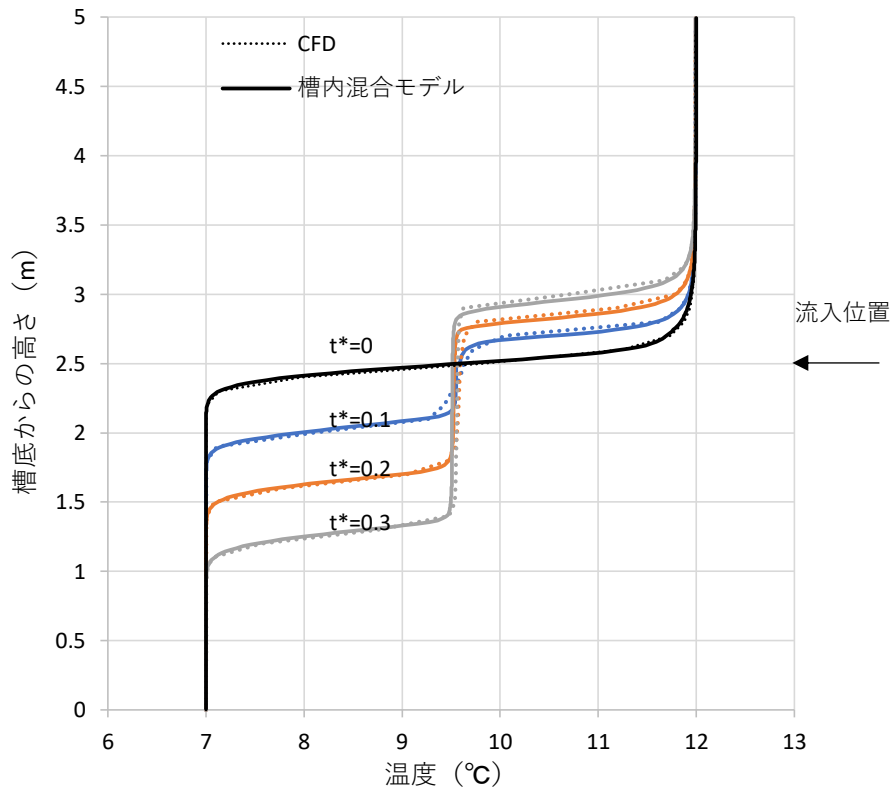


図 5.31 CaseB11 の槽内混合モデルと CFD 解析の比較 (解析空間 19)

5.5 第 5 章まとめ

本章では、任意の流入出位置に対応した温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデルについて、CFD 解析によるパラメータの同定を行い、槽内混合モデルの計算結果と CFD 解析による槽内温度分布の比較を行った。

温度成層を持つ蓄熱槽に任意の高さからの流入出がある場合、入口アルキメデス数が小さく、槽内水温が流入温度と等しい位置と流入位置が大きく異なる場合を除いて、提案した槽内混合モデルの計算結果は CFD 解析結果とよく一致しており、槽内温度を精度良く予測できることが示唆された。

第 6 章

総括

第1章では、本研究の研究背景、温度成層型蓄熱槽の概要、既往の研究、研究目的、研究概要について述べ、再生可能エネルギーや廃熱などを最大限利用するため、複数の熱源からの冷熱や温熱を温度帯や熱量に応じて蓄熱し、冷暖房や給湯など複数の用途に利用することが可能な蓄熱システムの提案をした。

第2章では、複数温度帯の蓄熱に対応した温度成層型蓄熱槽の模型実験の実験目的、実験装置の概要、実験条件、実験手順について述べた。

第3章では、前章で述べた模型実験と同条件で CFD 解析を行い、換水回数 0.1 回毎の槽内温度分布の推移について実験結果と CFD 解析結果を比較し、CFD 解析の計算精度の検証を行った。

第4章では、温度成層化した蓄熱槽内の混合性状への流入位置等の流入条件の影響について CFD 解析を用いて数値実験を行い検証した。

第5章では、任意の流入出位置に対応した温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデルについて、CFD 解析によるパラメータの同定を行い、槽内混合モデルの計算結果と CFD 解析による槽内温度分布の比較を行った。

以下に本研究のまとめについて述べる。

本研究では、再生可能エネルギーや廃熱などを最大限利用するため、複数の温度成層が形成される蓄熱槽に任意の高さにおいて流入出がある場合に、簡易に槽内温度を予測できる槽内混合モデルの開発を目的としている。

はじめに、複数温度帯の蓄熱に対応した温度成層型蓄熱槽を対象とし、蓄熱槽性能の把握のための模型実験を行い、CFD 解析と比較して槽内温度についての計算精度の検証を行った。実験において複数温度帯の蓄熱が可能であることが明らかとなり、また、CFD 解析によって十分な精度で槽内温度を予測できることが確認された。

次に、CFD 解析を用いた数値実験により、温度成層化した蓄熱槽内の混合性状への流入位置等の流入条件の影響について検討した。その結果、槽内温度が流入温度と等しい位置に流入させることで、槽内水と流入水の混合損失を抑制できることを確認し、流入位置がこれと異なる場合の槽内混合性状を明らかにした。

そして、提案した槽内混合モデルの計算結果と CFD 解析による数値実験の結果を比較し検討を行った。温度成層を持つ蓄熱槽に任意の高さからの流入出がある場合、入口アルキメデス数が小さく、槽内水温が流入温度と等しい位置と流入位置が大きく異なる場合を除いて、提案した槽内混合モデルの計算結果は CFD 解析結果とよく一致しており、槽内温度を精度良く予測できることが示唆された。

記号

α	: 熱拡散率[m ² /s]
κ	: 水の温度伝達率[m ² /s]
A	: 断面積[m ²]
b	: ジェット半径[m]
E	: 連行係数[m ² /s]
g	: 重力加速度[m/s ²]
\tilde{g}	: 浮力加速度[m/s ²]
h	: 高さ[m]
\dot{v}	: 密度噴流の体積フラックス [m ³ /s]
\dot{M}	: 運動量フラックス [m ⁴ /s ²]
u	: ジェット速度 [m/s]
p, s	: ローカル座標[m]
T	: 温度[K]
U	: 水平断面流速
θ	: 角度 [rad]
r, z	: グローバル座標 (円筒座標) [m]
ρ	: 密度[kg/m ³]
L	: 混合域拡張深さ[-]
Ar	: 入口アルキメデス数[-]

添え字

1	: 中立浮力レベル
2	: 最大上昇レベル
c	: 中心線
in	: 流入
ref	: 基準
o	: 初期
st	: 槽内

参考文献

- 1) 中島康孝ほか, カスケード型蓄熱槽に関する研究 (その 1~12) , 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, (1998~2001)
- 2) 奥宮 正哉, 中原 信生, バランス型蓄熱槽に関する研究 第 1~2 報, 空気調和・衛生工学会論文集, No.24, pp.21-34(1984) , No.11, pp.69-77(1986)
- 3) Janne Dragsted, Simon Furbo, Mark Dannemand, Federico Bava, Thermal stratification built up in hot water tank with different inlet stratifiers, Solar Energy, Volume 147, pp. 414-425 (2017)
- 4) 玉井信行, 新体系土木工学 22 密度流の水利, 技法堂出版, 1980
- 5) P.Steinert, S. Goppert, B. Platzer, Transient calculation of charge and discharge cycles in thermally stratified energy storages, Solar Energy, Volume 97, pp. 505-516, (2013)

謝辞

本論文を作成するにあたり、三重大学北野博亮准教授には終始適切な助言を賜り、また丁寧なご指導と温かいご配慮を賜り深く感謝の意を表します。

ならびに、三重大学永井久也教授及び同岩田剛氏には、本論文の完成に至る今日まで、多大なるご指導を受けましたことを厚く感謝いたします。

また本研究を進めるに当たり、研究に必要な実験装置及びその運転に関してご協力頂き、ここに三重大学工学研究科技術部設計・計測グループに対して感謝の意を表します。