

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04729

研究課題名（和文）温度レベルの異なる熱源に対応する複数温度帯同時蓄熱槽に関する研究

研究課題名（英文）Study on Temperature Stratified-thermal Energy Storage Tank Corresponding to Thermal Storage at Multiple Temperature Zones

研究代表者

北野 博亮（Kitano, Hiroaki）

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80293801

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：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開発を目的としている。本研究では、高さ方向に複数の流入出口を設けた温度成層型蓄熱槽を対象に、模型実験による基本性能の把握、多様な条件の複数の温度帯の蓄熱を想定した数値流体解析を行い、槽内温度性状を予測するための槽内混合モデルを開発した。また、冷熱をカスケード利用する蓄熱式空調システムのシミュレーションを行い、実用可能性について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、複数の温度帯の冷温熱を一つの温度成層型蓄熱槽で蓄放熱可能であることを示し、その温度分布を簡易に予測できる槽内混合モデルを開発した。このような蓄熱槽を導入することで、熱のカスケード利用時に温度帯毎の熱需給のアンバランスがある場合でも、熱の有効利用が可能となると考えられる。また、蓄熱槽内温度を簡易に予測可能となったことから、蓄熱槽の設計法の検討や蓄熱システムのシミュレーションによる性能評価が容易となり、自然エネルギーや廃熱等の高度な有効利用の促進と建築物における化石エネルギーの消費の削減が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop a thermal energy storage system that can store and use cold and warm heat according to temperature zones and heat quantities. First, a model experiment of a temperature stratified thermal storage tank with multiple inlets and outlets in the height direction was conducted to evaluate the basic performance of the thermal storage tank. Next, a computational fluid dynamics analysis was performed to simulate multiple temperature ranges of heat storage under various conditions. Then, a mixing model was developed to predict temperature distribution in the tank. Finally, a simulation of a thermal storage air-conditioning system that uses cascading cold heat was conducted to evaluate its practical feasibility.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：建築設備 蓄熱槽 温度成層型 実験 モデル

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

自然エネルギーや廃熱、熱回収型ヒートポンプ等の利用において、熱需給の時間的ギャップが問題となるが、蓄熱システムと組み合わせることで熱エネルギーの高度な有効利用が可能となる。

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。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、冷熱蓄熱時は上部から取水し、冷凍機で冷却した冷水を下部から流入させる。一方、本研究で対象とする蓄熱槽は、中間高さにも複数の流入出口を設置し、複数の温度帯（7-12°C、12-20°C、・・・）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。

このような蓄熱槽は、中島ら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、槽内水温の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。

申請者は、種々の温度成層型蓄熱槽の槽内温度を精度良く予測できる槽内混合モデルを開発しており、太陽熱利用冷房システムに適用する流入出位置を流入温度等によって選択する流入出位置選択型の温度成層型蓄熱槽の槽内混合モデルの開発に取り組んでいる。

### 2. 研究の目的

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開発を目的としている。蓄熱槽として、高さ方向に複数の流入出口を設けた温度成層型蓄熱槽を対象として、蓄熱槽の基本性能の把握と槽内温度性状を予測するための槽内混合モデルの開発、多様な熱源で構成されたシステムを想定したシミュレーションによる性能評価を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 複数の温度帯の蓄熱が可能な温度成層型蓄熱槽の模型実験

円筒型の貯湯槽を改造して模型蓄熱槽を作成し、二つの温度帯（7-12°C、12-17°C）での蓄熱実験を行い、蓄熱槽性能や混合損失の定量的な把握を行うとともに、CFDと槽内混合モデルの精度検証のための比較データを収集した。

#### (2) 数値流体解析（CFD）の再現性の検討と数値実験

温度成層型蓄熱槽のような乱れの抑制効果が高い流れの解析に用いられている乱流モデルを用いた数値流体解析を行った。まず、実験結果と比較して槽内温度についての計算精度の検証を行い、次に、実験では不可能な条件を含む、複数の温度帯の蓄熱を想定した解析を行った。

#### (3) 槽内温度を予測するための槽内混合モデルの開発

複数の温度成層が形成される蓄熱槽に任意の位置（高さ）において流入出がある場合の、槽内混合性状のモデル化を行った。流入水が密度噴流として槽内を移動し、槽内水との密度差等に応じて、槽内水と混合する領域の位置と深さを決定する方法を提案し、実験結果とCFDの結果を用いて、混合域の深さに関する実験式の係数同定とモデルの精度検証を行った。

#### (4) 運転シミュレーションによる性能検証と最適化

二つの温度帯で、冷熱のカスケード利用する空調システムに、この蓄熱槽を導入した場合のシミュレーションを行い、想定した運転の実現可能性の検討、蓄熱槽の混合損失の定量的把握、蓄熱槽容量や流入出口設置位置等の最適化について検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 複数の温度帯の蓄熱が可能な温度成層型蓄熱槽の模型実験

基本的な蓄熱性能の把握と数値流体解析および槽内混合モデルの精度検証のための比較データの収集のため、模型実験を行った。模型実験では、円筒型の貯湯槽を改造し、容量 0.17 m<sup>3</sup>,

水深 1.2 m の模型蓄熱槽を作成し、槽の上部と中間高さ、下部の 3 か所に円盤型の流入出口を設置した。実験の流入出条件として、基本的な槽下部から取水し上部からの高温水入力する実験の他、蓄熱槽の上部、中間、下部にそれぞれ、7、12、17°C 水を流入出する実験を行った。実験の結果、一つの蓄熱槽内に二つ温度帯 (7-12°C, 12-17°C) で良好な温度成層が形成されること、混合損失の少ない蓄熱が可能であること等が確認できた。

## (2) 数値流体解析 (CFD) の再現性の検討と数値実験

数値流体解析を行い、実験結果を用いて槽内温度の計算精度の検証を行っている。数値流体解析の結果、基本的な槽下部から取水し上部からの高温水入力する実験について、槽内温度の推移を精度よく予測できることを確認した。図 1 に結果の一例を示す。

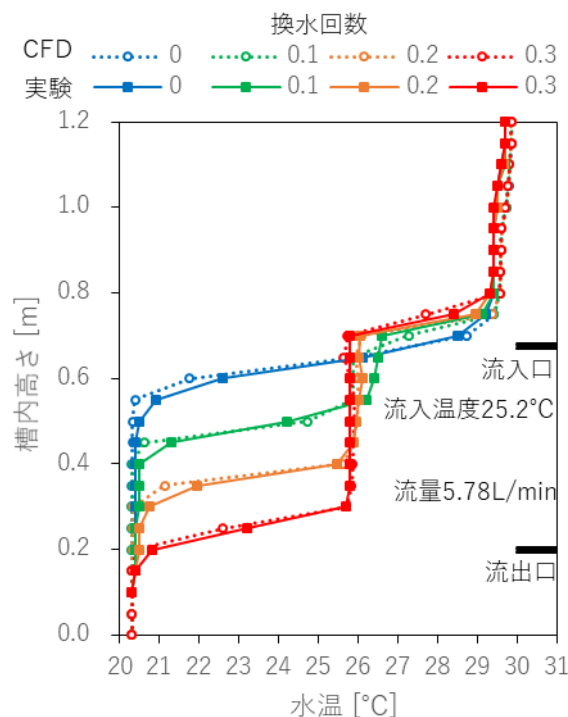


図 1 実験結果と CFD 結果の槽内温度分布の比較

数値流体解析によって、模型実験装置では不可能な条件の解析を行い、温度分布のある槽内に中間的な温度の流入がある場合、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こと、流入位置によっては、初期の槽内の高温領域が流入水との混合により温度が低下する等、相当量の混合損失が生じること等が明らかとなった。

## (3) 槽内温度を予測するための槽内混合モデルの開発

複数の温度成層が形成される温度成層型蓄熱槽の槽内温度を予測するための槽内混合モデルの検討を行った。流入温度と流入位置の槽内温度が異なる場合に、流入水を密度噴流として取り扱い、流入水と槽内水の混合性状をモデル化した。開発した槽内混合モデルによる槽内温度分布

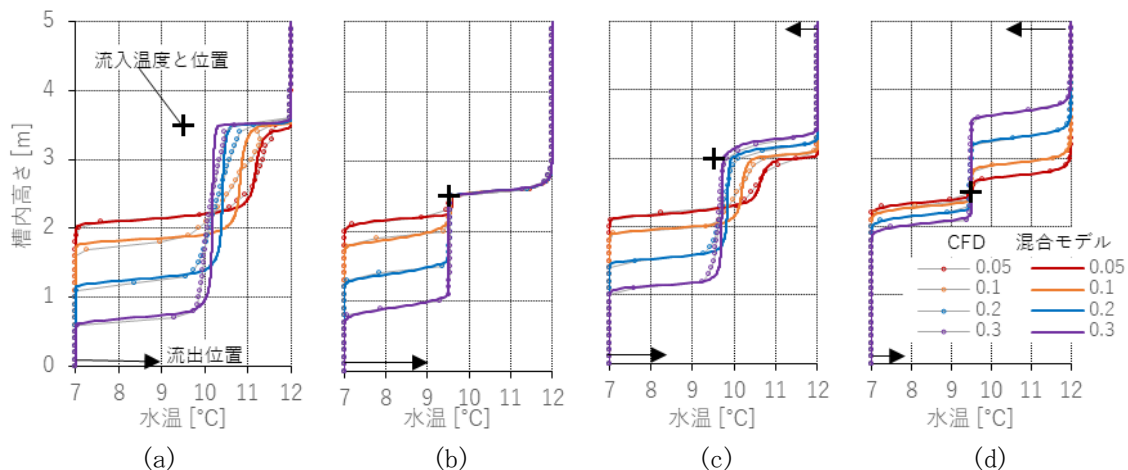


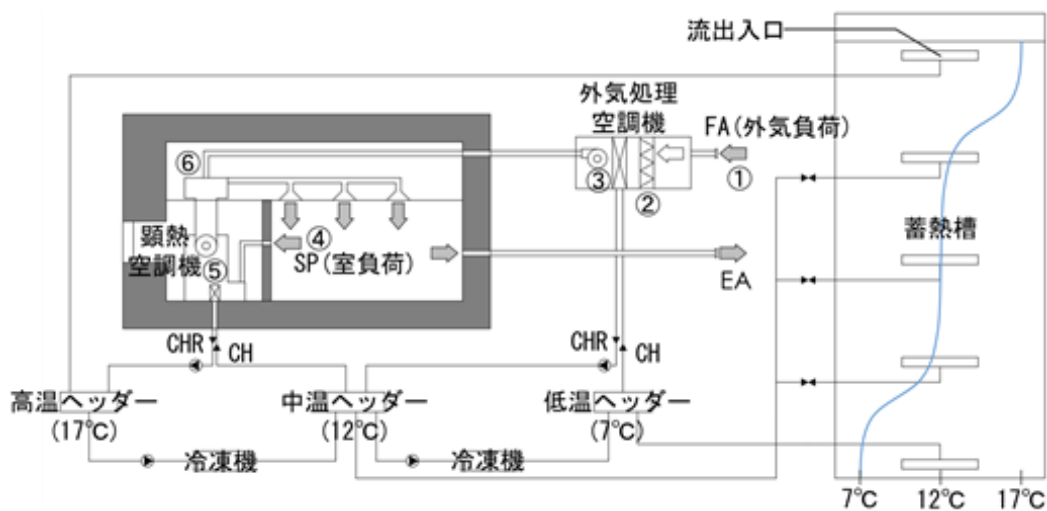
図 2 CFD と槽内混合モデルの槽内温度分布の計算結果の例

の結果は、数値流体解析の結果とおおむねよく一致し、CFD 解析と比較して大幅な計算時間の短縮が実現できた。一方で、流入水温と槽内水温が等しい位置と流入位置が大きく異なる場合（図 2 (a)）では、温度分布に差異がみられる結果となり、モデルの修正が必要であると考えている。

モデルの若干の修正は必要であるが、本モデルによって複数温度帯の蓄熱が可能な蓄熱槽の設計法や蓄熱システムの長期シミュレーションによる性能評価が容易となり、自然エネルギーや廃熱等の高度な有効利用の促進と建築物における化石エネルギーの消費の削減が期待できる。

#### (4) 運転シミュレーションによる性能検証と最適化

事務所ビルを想定した冷房負荷に対し、図 3 に示した低温冷水を用いる外調機と中温冷水を用いる室内顕熱空調機からなる 2 次側システムに、複数温度帯の蓄熱槽を組み合わせた空調システムを想定したシミュレーションを行った。図 4 に槽内温度分布の計算結果の一例を示した。熱需給の調整、中温冷水の所定の温度での蓄放熱等、想定した運転が実現可能であることが確認できた。また、負荷特性や熱源運転制御方法に応じて流入設置数を抑制できることを明らかにした。例えば、図 4 に示した条件の場合では、初夏と盛夏のそれぞれ 2 週間のシミュレーションの結果、中間の流入出口を 2, 3, 4m の 3 か所削減しても中温冷水を所定の温度で蓄放熱できること等を確認した。



- ①外気取入口 ②フィルター ③冷却コイル（外気空調機） ④室（オフィス）  
⑤冷却コイル（顕熱空調機） ⑥チャンバー

図 3 システムの概要図

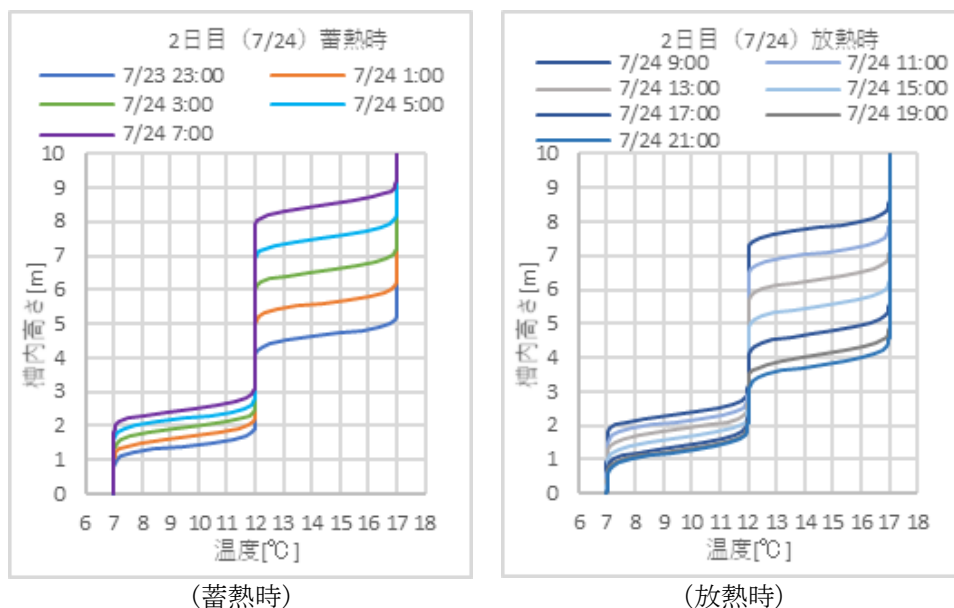


図 4 槽内温度分布の計算例(鉛直方向 1m 毎に流入出口を設置)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 篠原将太郎, 北野博亮, 岩田剛, 永井久也
2. 発表標題 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 その1 CFD解析による槽内温度分布予測
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会中部支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 篠原将太郎, 北野博亮, 永井久也, 岩田剛
2. 発表標題 複数の温度レベルの蓄熱に対応する温度成層型蓄熱槽に関する研究 その1 模型実験とCFD解析の比較
3. 学会等名 日本建築学会東海支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 篠原将太郎, 北野博亮, 岩田剛, 永井久也
2. 発表標題 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 その2 槽内混合モデルとCFD解析の比較
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会中部支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 篠原将太郎, 北野博亮, 永井久也, 岩田剛
2. 発表標題 複数温度帯の蓄熱に対応した温度成層型蓄熱槽の CFD 解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	岩田 剛  (Iwata Takeshi)  (20636542)	三重大学・工学研究科・技術専門員   (14101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------