

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360236

研究課題名(和文) 温度成層型蓄熱槽の極限性能を可能とする垂直吹出・吸込ディフューザーの研究

研究課題名(英文) Study on Vertical Input/output Diffuser having Extreme Performance in Temperature-stratified Thermal Storage Tank

研究代表者

相良 和伸 (Sagara, Kazunobu)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30109285

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、日中の電力需要ピーク低減効果が大きい蓄熱式空調システムで用いられる水蓄熱槽の極限性能を可能とするディフューザーを開発している。実験と理論、そしてコンピュータによる数値流体解析を活用して、蓄熱システムの様々な設計条件と蓄熱性能との関係を探り出し、性能向上には限界があることを示した。本研究により、限界性能を持つとともに、低コストで構築できる高性能蓄熱システムの設計が容易にできるようになった。

研究成果の概要(英文)：Thermal energy storage air-conditioning system is effective for reduction of daytime peak demand in electric power. In this research project, diffuser installed in storage water tank was developed to have the highest performance. The relationship between various design parameters of storage system and thermal storage performance was introduced through theoretical and experimental study and computer simulation of fluid dynamics, and it was found that there can be the limit in improving performance of diffuser design. The thermal energy storage system of low cost in construction can be easily designed to have the highest performance.

研究分野：建築設備

キーワード：蓄熱 温度成層 ディフューザー CFD 実験 性能評価 設計 簡易モデル

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災に起因する福島第一原子力発電所の事故により、社会的に原子力発電所の稼働が抑制されたために、当事者の東京電力だけでなく、他の電力会社でも電力需要が逼迫することになった。震災の影響がなかった地域にまで電力需要のピークを低減しなければならない状況となっている中で、日中の電力需要を夜間に転換する電力負荷平準化が可能な蓄熱式空調システムが再び注目されている。一時期、テレビコマーシャルでポピュラーとなったエコアイス（氷蓄熱）は氷の融解熱を利用するために高い蓄熱性能が期待できるが、製氷時の冷凍機の性能低下が問題となる。本研究で対象とする温度成層型水蓄熱は、製氷時の性能低下が無く、非常時には貯蔵されている水自身を消火用水や雑用水にも転用できる防災拠点などに最適な蓄熱システムである。温度成層型蓄熱槽は、従来タイプの蓄熱槽に比べて蓄熱性能が高いことから近年設置されることが多くなったが、電力負荷平準化をより効果的に実現するために水蓄熱槽の極限性能が要求されるようになってきており、本研究で取り組む垂直吹出・吸込方式のディフューザーの特性が明らかとなり、容易に高性能蓄熱システムが設計可能となれば、社会的にも大きい貢献が可能となると考えている。

2. 研究の目的

本研究は、日中の電力需要ピーク低減効果が大きい蓄熱式空調システムで用いられる温度成層型水蓄熱槽の極限性能を可能とする低コストなディフューザーを開発しようとするものである。高性能が期待されながらも経験的に設計されてきた垂直吹出・吸込方式のディフューザーについて、理論的検討を基礎に置いた実験と数値流体解析（CFD）により体系的に研究に取り組むことで、空調設備の設計者が容易に高性能蓄熱システムを設計できるようにすることを最終的な目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、理論的検討を踏まえた実験とCFDを実施し、種々の設計パラメータと蓄熱性能との関係を明らかにした。これまでも、地域冷暖房施設に設置予定の温度成層型蓄熱槽を対象としてCFDにより低コストで設置可能な垂直吹出・吸込方式のディフューザーの特性検討を行ってきており、本研究では、実験による基本性状の検討、CFDの乱流モデルの検討と精度検証、ディフューザー形状の検討、性能評価の体系化と理論的検討を実施し、種々の設計条件下における蓄熱性能予測法の検討を行った。

4. 研究成果

本研究では、実験により、ディフューザーの基本性状を検討するとともにCFDの精

度検証を行った。そして、種々の条件におけるCFD解析結果を整理して、蓄熱システムの設計条件に応じたディフューザーの設計パラメータと蓄熱性能の関係を明らかにし、設計者が容易に蓄熱性能を予測することができる手法を示した。

(1) 実験による基本性状検討とCFD検証

槽内温度分布測定実験に用いた垂直流入ディフューザーとして、ハーフパイプ型流入口とボックス型流入口のそれぞれ上部にパンチングメタルを取付けた2タイプ（図-1）を用い、設置水深（水面から流入口上面までの距離）を変えた実験を行なった。

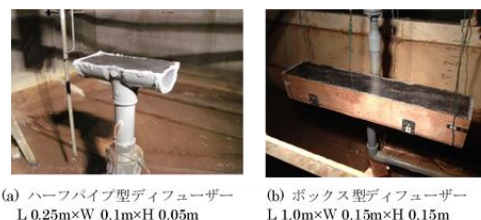
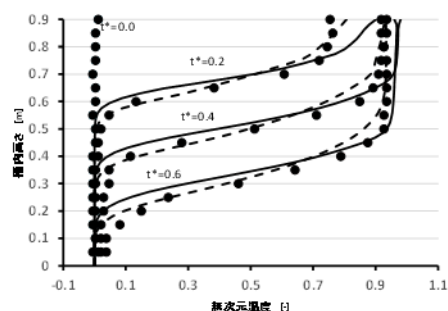
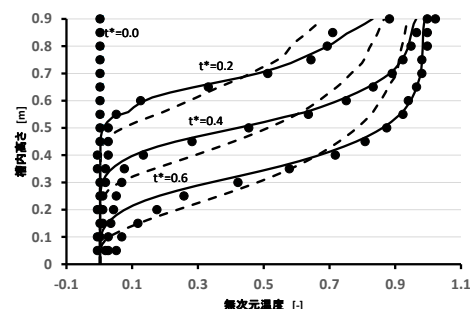


図-1 実験で用いたディフューザー

●実験結果 — 計算結果(層流モデル) - - - 計算結果(乱流モデル)



(a) 乱流モデルの方が一致する例
(ハーフパイプ型ディフューザー)



(b) 層流モデルの方が一致する例
(ボックス型ディフューザー)

図-2 実験とCFDの槽内温度分布の比較

層流モデルと乱流モデル（RNG $k-\epsilon$ モデル）のそれぞれで計算した槽内温度分布の時間推移の計算結果と実験結果の比較を図-2に示す。吐出面での流速が比較的速い場合には乱流モデルの方が良く一致していたが、流入流速が遅い場合には層流モデルの方が

良く一致する結果となった。ディフューザー吐出面の見かけの平均流速を代表速度、ディフューザー吐出面の等価直径を代表長さとして算出される見かけの Re 数を求めると、おおよそ 2000 以上で乱流モデルが良く一致することが分かった。

(2) CFDによるモデルパラメータの同定

鉛直流入方式のディフューザーの基本条件の検討として吐出面で均等流入流速を仮定した場合のCFD解析（均等流速モデル）による槽内温度分布から槽内混合モデルのパラメータ同定を行った。解析対象条件については、槽水深、ディフューザー形状、ディフューザー設置水深、流入流量を変えた 342 ケースである。解析蓄熱槽の概要を図-3に、解析条件の一覧を表-1に示す。

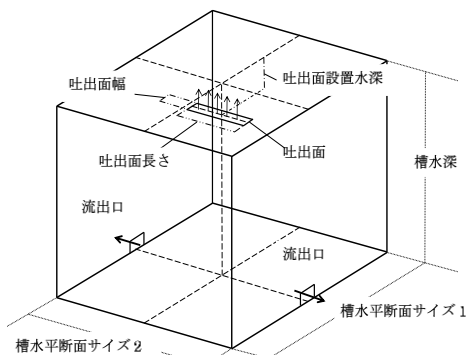


図-3 解析蓄熱槽の概要

表-1 解析条件一覧

槽規模	吐出面サイズ[m]		吐出面設置水深[m]	流入流量 [m ³ /h]
	幅	長さ		
水深1m	0.05	0.05,0.2,0.4		0.3(10h換水)
水平断面3m×1m	0.10	0.1,0.2,0.4		0.6,1.2,2.4
槽容量3m ³	0.15	0.15,0.45,0.9		4.8,9.6,19.2
水深2m	0.10	0.1,0.45,0.9	0.05	0.9(10h換水)
水平断面3m×1.5m	0.15	0.15,0.45,0.9	0.10	1.8,3.6,7.2
槽容量9m ³	0.20	0.2,0.8,2.0	0.20	
水深4m	0.15	0.15,0.8,2.0		3.6(10h換水)
水平断面3m×3m	0.20	0.2,0.8,2.0		7.2,14.4,28.8
槽容量36m ³	0.30	0.3,0.8,2.0		

CFD解析結果から抽出した槽内平均鉛直温度分布と槽内混合モデルによる鉛直温度分布の温度成層部の平均温度勾配がもっとも一致したときのモデルパラメータ値を求めた例を図-4に示す。

342 ケース全てについてモデルパラメータを同定し、ディフューザー形状と流入流量、流入温度、槽内初期温度による入口アルキメデス数と同定されたモデルパラメータとの関係を次式のような形に整理して図に表したものが図-5である。

$$\frac{\ell_0}{d_m} \cdot \left(\frac{x_s}{d_m}\right)^{-0.8} = f \left(Ar_{in} \cdot \left(\frac{x_s}{d_m}\right)^2 \right)$$

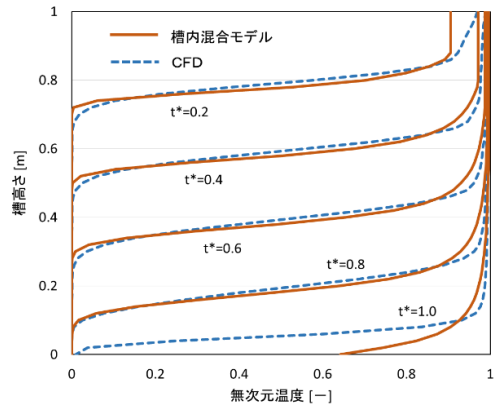


図-4 同定パラメータによる槽内混合モデルで計算した槽内温度分布とCFD結果

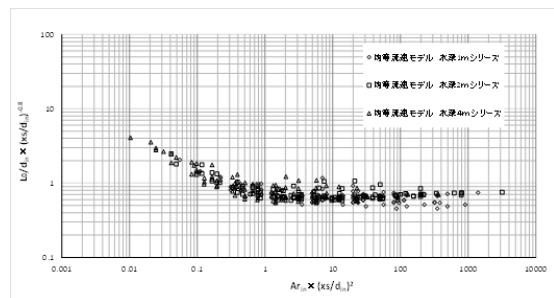


図-5 モデルパラメータとアルキメデス数

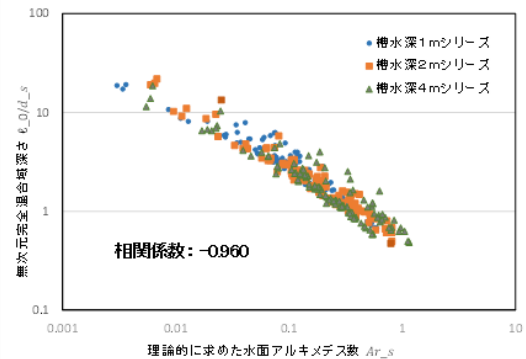


図-6 モデルパラメータと水面アルキメデス数

(3) 性能向上限界の理論的検討

図-5を見ると、横軸の入口アルキメデス数がある程度以上となってもモデルパラメータ値は変化しておらず、蓄熱性能向上には限界が存在することがわかる。その理由を探るために、ここでは槽上部の水面付近に設置されたディフューザーの吐出部から鉛直上方に吹き出された高温上昇流入水が周辺水よりも高温であることが原因で浮力によって加速されることに配慮して、上昇流入水が水面に到達したときの流速、温度、代表長さを用いて新たに水面アルキメデス数を定義することとする。図-6にモデルパラメータと理論的に得られた水面アルキメデス数の関係を示したが、ほぼ線形関係となっていることが分かる。これは、流入流速が小さくなって入口アルキメデス数が大きくなって、

流入後に水面に到達する間に流速が早くなるために水面レベルではアルキメデス数が小さくなり、結果として、蓄熱性能が変わらなくなっていることを示しており、ディフューザー吐出部で定義される入口アルキメデス数がある程度以上大きくなっても蓄熱性能が向上しない理由が明らかとなった。

(4) ディフューザー設計法提案への展開

種々の条件のCFDを実施した結果を整理することによって、設計条件から定まる入口アルキメデス数と蓄熱性能を表す無次元パラメータとの関係がある程度得られたことで、この結果を温度成層型蓄熱槽のディフューザー設計法提案へ展開することができる。入口アルキメデス数とモデルパラメータとの関係により、入口アルキメデス数がある程度以上となっても性能が変化しないことから、要求される性能以上となるときの入口アルキメデス数 K_{Ar} とそのときのモデルパラメータ K_{f_0} が図-7のように設定可能であるとす。

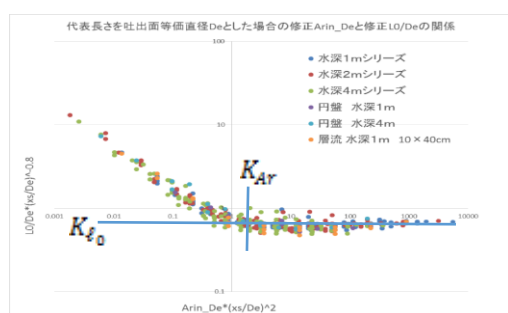


図-7 限界性能とアルキメデス数

ある程度以上入口アルキメデス数が大きくなっても蓄熱性能は向上しないことから、必要な性能以上の性能となるときの入口アルキメデス数とディフューザー設置水深との関係を設定すれば、ディフューザー吐出面の等価直径としてディフューザーサイズの決定が可能となり、矩形のディフューザーであれば、適当なディフューザー幅を設定することで、ディフューザー全体の形状を決定することができる。また、要求性能のモデルパラメータの値を設定すれば、槽内混合モデルを使って計算することにより、鉛直温度分布の推移の状況や蓄熱槽効率などのような蓄熱性能を予測することができるようになる。槽内混合モデルでの計算では、簡単なものではあるが、微分方程式を差分化して解くなど、一般の設備設計技術者には期待できないことから、誰でも使える設計資料として整備するためには、プログラムを作成して一般に公開するか、設計用図表の形にまとめるのか、という問題があり、具体的な設計手順の構築と蓄熱性能の確認方法については、今後の継続研究が必要であるが、おおよそ目処が付いたと言える段階にまで達したと考えている。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計20件)

- ① Takeshi Iwata, Kazunobu Sagara, Hiroaki Kitano and Hisaya Nagai: Study on Performance Estimation of Temperature-stratified Type Thermal Storage Tank by Tree-dimensional Unsteady CFD, 24th Energy and the Environment, pp.301-309, 2014.10.22-24, Opatija (Croatia)
- ② 樋津太一, 相良和伸, 小林知広, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 古賀修, 一谷匡陸, 西山満: Performance Estimation of Vertical Inflow Diffuser for Temperature-stratified Type Thermal Storage Tank by CFD Analysis- Effect of Tank Water Level and Step Change of Flow Rate on Temperature Distribution, 空気調和・衛生工学会, 2014.9.3-5, 秋田大学 (秋田県・秋田市)
- ③ 岩田剛, 相良和伸, 北野博亮, 永井久也, 岩田美成, 一瀬茂弘: 温度成層型蓄熱槽におけるCFD解析のモデル化方法の妥当性検証, 空気調和・衛生工学会, 2014.9.3-5, 秋田大学 (秋田県・秋田市)
- ④ 岩田剛, 相良和伸, 北野博亮, 永井久也: 垂直流入口を有する温度成層型蓄熱槽におけるCFD解析の検証, 空気調和・衛生工学会, 2013.9.25-27, 信州大学 (長野県・長野市)
- ⑤ 樋口彩子, 小林知広, 岩田剛, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 古賀修, 一谷匡陸, 西山満: 温度成層型水蓄熱槽のCFD解析ーディフューザー吐出部のパンチングメタルのモデル化手法の検討ー, 空気調和・衛生工学会, 2013.9.25-27, 信州大学 (長野県・長野市)
- ⑥ 相良和伸, 岩田剛, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚: 温度成層型蓄熱槽の水平入力型流入口における性能向上限界の理論的検討, 日本建築学会, 2012.9.12-14, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- ⑦ 森下悟史, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 小林知広, 古賀修, 一谷匡陸, 西山満, 岩田剛: 鉛直吹き出しディフューザーを有する温度成層型水蓄熱槽の性能予測に関する研究ーCFD解析による槽内混合モデルのパラメーター同定, 空気調和・衛生工学会, 2012.9.5-7, 北海道大学 (北海道・札幌市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

相良 和伸 (SAGARA, Kazunobu)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30109285

(2) 研究分担者

甲谷 寿史 (KOTANI, Hisashi)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 20243173

北野 博亮 (KITANO, Hiroaki)
三重大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号： 80293801

岩田 剛 (IWATA, Takeshi)
三重大学・大学院工学研究科・技術専門職員
研究者番号： 20636542