

令和元年6月14日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06609

研究課題名(和文) 未利用エネルギーを主体とした熱供給網の構築 - 貯留水の有効活用手法の検討 -

研究課題名(英文) Development of heat supply network using unutilized energy -Application of reservoirs as heat source-

研究代表者

金田一 清香 (Kindaichi, Sayaka)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00396300

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、農業用のため池や調整池、貯水池の水(貯留水)をヒートポンプシステムの熱源として活用することを提案し、CFD解析や実験結果に基づき、運転や停止による熱源温度の変動を簡便かつ高精度に計算するモデル(マクロモデル)を構築した。マクロモデルでは、温度成層下において底部からヒートポンプの排熱を放出する際の自然対流の挙動をCFD解析により算出し、水中に生じる受熱量分布をあらかじめ求めることで短時間での年間計算を可能にした。実測および実験値との比較により、マクロモデルの計算結果の妥当性を確認し、また空気熱源方式と比べ省エネルギー性に優れた方式であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は貯留水を未利用エネルギーのひとつと位置づけ、その有効活用の形態を示すものである。これまで大規模な地域熱供給事業等に限定されてきたヒートポンプシステムにおける水熱源の活用を中～小規模でも可能にすることから、地方での未利用エネルギー導入推進に意義があると考えられる。また、貯留水では夏季に緩やかな温度成層が形成されるが、このとき内部の水循環が停滞し水質上の問題を生じることがあり、対応策として意図的に成層を破壊する試みもみられる。熱源としての貯留水の活用はこうした水質・環境問題の緩和の可能性も有している。

研究成果の概要(英文)：We have developed a water source heat pump system using water reservoirs intended for agricultural applications or flood control as a heat source. In this study, we proposed a practical model using TDR (Thermal Distribution Rate), which describes natural convection during heat release from heat pumps, to calculate seasonal variations of heat source temperature. TDR model shows reasonable changes of heat source temperature regardless of whether heat pumps are operated or stopped. Several calculations show high energy saving effects >20% compared to air source heat pumps, indicating that reservoirs are a possible heat source in heat pump systems.

研究分野：未利用エネルギー活用

キーワード：未利用エネルギー ヒートポンプ 熱源 貯留水 マクロモデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒートポンプは省エネルギー性の高い空調技術として知られ、その効率は原理上、熱源の温度に大きく影響される。一般的なヒートポンプの熱源として「空気」があげられるが、空気よりも夏に低温、冬に高温な河川水や地下水、下水等の「水」や「地盤」の持つ熱（以下、地中熱と呼ぶ）を活用できるならば、有望な未利用エネルギー源になり得ると考えられる。

水や地盤は空気の数千倍の熱容量を持つため、移流が卓越しない限り、放熱/採熱を続けると冷蓄熱/温蓄熱状態になるが、水の場合は自然対流による熱拡散性の向上が期待できるため、有望な熱源といえる。特に、熱需要先の近隣に大量に存在するならば、安定的に省エネルギーを実現できる可能性がある。現状、水を熱源としたヒートポンプシステムは多くないが、この理由として以下の事項があげられる。

- a) 河川水や海水の場合、規模が大きくなり地域熱供給事業での導入に限定される
- b) 地下水のくみあげには法的規制がある場合が多い
- c) 大規模湖沼は国立公園等の中にある場合が多く、また近隣に適当な熱需要先がない
- d) 水利権や漁業権の問題から水の直接利用は難しい
- e) 熱源側の設計・施工や運用条件、コストが明らかになっていない
- f) 熱源温度の予測手法が未確立で、空気熱源方式と比べた省エネルギー効果が評価できない

申請者は a) ~ d) をクリアする手法として、都市近郊に多数賦存する農業用のため池や調整地、貯水池のうち、年間を通して水位が安定している水（以下、「貯留水」と呼ぶ）の持つ未利用エネルギーを、熱交換器を介して間接的に活用するヒートポンプシステムの適用可能性を検討してきた。技術的な課題としては e) f) が考えられ、特に地中熱ヒートポンプに関しては、近年実用的な熱源温度予測手法が提案されてきたのに対し、貯留水ヒートポンプに関する研究の蓄積はほとんどみられない。参考になる既往研究として、水理学分野における自然状態での水温構造に関する一連の研究があり、移流の少ない湖沼や貯水池では水面に作用する風応力や自然対流による鉛直混合を考慮する必要性が示されている。また、米国では人造湖を利用した熱源システムを導入している地域があり、湖水全体の熱収支を解くことで簡易に熱源温度を予測した研究がみられる。本研究で対象とする貯留水の場合、深さ 5 m 程度と浅く熱量的に制限があるため、有効に活用するには自然状態での混合過程や熱交換器からの放熱/採熱過程、停止中の温度回復等を考慮し、より精緻に熱源温度を予測する必要があるが、そのような手法は未だ確立されていない。

以上より、新たな未利用エネルギーである貯留水の有効活用手法の検討に当たり、まず熱源側の性能評価手法の確立が必要であり、空気熱など他の熱源の特性を踏まえた上で全体としてエネルギー消費を最小化できる負荷側の構成および運用方法を明らかにすることが有用である。

2. 研究の目的

本研究の主たる目的は、貯留水ヒートポンプ運用時の熱源温度の予測手法を確立することにある。空気熱等の他の熱源との併用または比較を想定し、空調システムシミュレーションに組み込み可能な簡便なモデル（マクロモデルと呼ぶ）を目指す。

具体的には以下のとおりである。

1) マクロモデルの構築

マクロモデルでは貯留水ヒートポンプ運用時の熱源温度、すなわち底部に設置する熱交換器近傍の水温を得ることを主たる目的とする。基本的には鉛直一次元方向の熱保存式を解くが、既往研究で確立されていない以下の事項を考慮する。自然環境下の水温構造について、秋季から冬季にかけて水表面の熱収支が放出側に移行する際に発生する自然対流を水理学分野の既往研究を参考にモデル化する。熱交換器からの放熱/採熱過程をモデル化する。特に、熱源温度に対する影響が大と予想される夏季の自然対流による放熱過程について、CFD 解析による詳細な流速分布を基に密度等の物性値を変数として定式化する。ヒートポンプ停止中の温度回復を考慮した運用方法の検討のため、運転/停止時間を月毎または季節毎等、任意に変更できる仕組みとする。

2) マクロモデルの再現性検証

マクロモデルの再現性を以下の 2 段階に分けて検証する。

熱源（熱交換器）が無いと仮定したときの水温分布を申請者が過去に実施した調整池における実測結果との比較により検証する。

熱交換器から放熱する際の検証は、まず後述する水泳用プールと実大熱交換器を用いた放熱実験の諸条件を与えた CFD 解析を実施し、自然対流の到達範囲や温度レベルが合致することを確認する。その後、1 で述べた自然対流の特性式を求め、マクロモデルに組み込む。マクロモデルの再現性が低い場合には、基礎式の見直しやパラメータの精査を行い、最終的に熱交換器近傍の水温が最大 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度以内の誤差となるよう改良する。

3) 貯留水ヒートポンプの性能評価

上記 1, 2 で作成したマクロモデルにより、貯留水ヒートポンプの性能評価を行う。第一に、放熱/採熱の出力や運転/停止時間等の運用条件をパラメータとしたときの年間熱源温度を比較し、空気熱源方式と比して熱源温度の優位性を担保できる条件を明らかにする。第二に、夏季放熱時の自然対流の影響範囲を確認することで、熱交換器の容量や設置間隔等、実運用時に必要な設計条件をまとめる。

4) 未利用エネルギーを主体とした熱供給網の構築

3 で得られた貯留水ヒートポンプの特徴を活かした未利用エネルギー主体の冷房・暖房用熱供給網を構築する。空調システムシミュレーションにより、熱源構成や運用条件をパラメータとした計算を行い、未利用エネルギーを最大活用しながらエネルギー消費を最小化する条件を明らかにする。

3. 研究の方法

1) マクロモデルのモデリング

空調システムシミュレーションにおいて従来の空気熱源方式と容易に比較できる熱源温度予測モデル(マクロモデルと呼ぶ)の構築を目指し、定式化・プログラミングを行う。

貯留水ヒートポンプの熱源温度の算出には、熱交換器付近の水温が重要であり、放熱/採熱により生じる上下温度分布を合理的に計算する手法が有用である。冬季暖房時は周囲より低温の排熱が底近傍に滞留するため、解析的には最下層に放熱量を与える等により比較的簡単に再現できる。対して、夏季冷房時は周囲より高温の排熱が自然対流により拡散するため、より複雑なモデルが必要となる。本研究では、岩田らによるプリュームモデルを参考に、冷房時の熱交換器からの放熱過程をモデル化する。基本的には鉛直次元モデルとして扱い、放熱の影響が及ぶ範囲を対流域、それ以外を自然域と呼ぶ。対流は周囲との密度差に起因する「連行」により上層に行くほど範囲を増し、自然域と同じ密度になった時点で消滅する。各層の水量および熱収支を計算した後、水温の収束後に終了となる。高さ毎の連行量の計算には、当初は理論式を用いるが、後述する CFD 解析や放熱実験の結果を基に密度等をパラメータとして定式化し、プログラムに組み込む。なお、自然温度(自然域の水温)予測プログラムの一部は既に構築しており、これをマクロモデルのベースとして使用する。

2) CFD による放熱時の自然対流の検証

本項目では、夏季の自然対流を CFD により詳細に検証する。計算対象は後述する実験用水槽相当の矩形空間で、中央部の底面に熱交換器相当の面状熱源を与える。放熱量と初期水温について数種類の条件を与えたときの流速分布から、1 のマクロモデルに組み込む連行量特性式を導く。具体的には、比較的高温になる自然対流部とそれ以外に分けたときの境界面からの流入量に着目し、マクロモデルの計算格子(数 10 cm)程度の高さ毎に密度等をパラメータとした関数とする。

なお、3 の実験が終了し次第、実験と同じ境界条件を与えた計算を行い、放熱により生じる自然対流の拡散範囲や温度レベルについて実験値と照合する。もし、十分な精度が得られない場合は乱流モデルや計算格子数、境界条件等を精査し、熱交換器近傍の水温が最大 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度以内で再現できるよう改良を加える。再現性が確認できた後、連行量特性式をフィックスし、マクロモデルに組み込む。

3) 実大熱交換器を用いた放熱実験

実験用水槽に実大の熱交換器を設置した放熱実験を行う。申請者が行った深さ 5 m 程度の調整池を対象とした水温実測から、底部は夏でも 15~20 に維持されることがわかっており、この温度を水道または井戸水で再現するには実施時期は盛夏に比べ中間期が適している。また、予定している水槽深さは 2 m 程度であり貯留水に比べ浅いが、申請者の事前検討により、夏の温度成層状態では底部からの放熱の多くは下層での混合に用いられることがわかっており、水槽を用いた実験は適正と考えられる。放熱量としては住宅の暖冷房負荷約 1 軒分を想定し、6 kW 程度以下の範囲で熱源機の出力を調整する。実験日数はトータル約 20 日とする。実験は 1 日周期で行い、実使用を想定して最大 10 h 程度の放熱の後、放熱を停止した状態で水温の回復を観測する。温度計測は熱交換器の周囲(鉛直/水平方向)に 10~100 cm 間隔で設置し、自然対流の影響範囲が判別できるよう工夫する。実験結果はマクロモデルおよび CFD 解析の再現性検証のために使用する。

4) マクロモデルを用いたケーススタディ

以上 1~3 で作成したマクロモデルにより、地域固有の条件(気象条件、貯留水深さ)と運用条件(放熱/採熱量、日運転時間)をパラメータとしたケーススタディを行う。貯留水ヒートポンプ運用時の熱源温度について、各パラメータの感度を把握するとともに、空気熱源方式の熱源温度である空気温の挙動と比較する。また、夏季の放熱時に発生する自然対流の垂直・水平方向の影響範囲を確認し、放熱量との関係を考察する。

5) 未利用エネルギーを主体とした熱供給網の評価

貯留水ヒートポンプの特性を活かしながら、空気熱や太陽熱といった他のクリーンなエネルギーにより補完する複合熱源ヒートポンプシステムを検討する。過去の検討より、貯留水は冷房利用により適していると予想されるため、冷房は貯留水ヒートポンプ、暖房は空気熱源ヒートポンプと太陽熱が主体となるよう、4 の検討を基にシステム容量を決定する。負荷側は複数の建物用途の組み合わせを検討する。最後に、LCEM ツール等の空調システムシミュレーションにより、本提案システムと従来の空気熱源方式とのエネルギー消費量を比較する。パラメータは対象地、熱源構成、運用条件とする。

4. 研究成果

まず、H28 年度は貯留水ヒートポンプ運転時の熱源温度予測手法の構築のため、熱交換器が

らの自然対流による放熱過程を簡便に表した「マクロモデル」の定式化およびプログラミングを行った。空気熱等の他の熱源システムとの併用または比較を想定し、また将来的に空調システムシミュレーションへの組み込みを可能にするため、熱移動方程式を基本として自然対流による流れやそれに伴う連行は簡便にモデル化する手法を検討した。具体的には、温度成層型水蓄熱槽におけるプリュームモデルを参考に、放熱量や温度条件の関数として扱うこととした。

次に、実規模の調整池を対象として、中央部の底面に熱交換器相当の面状熱源を与えた際のCFD解析を行い、夏季および冬季の熱と流れのプロセスを明らかにした。特に、夏季は鉛直方向に最大15の温度分布が生じ、強固な温度成層が形成されることがわかっているが、このとき、放熱の影響は概ね下半分の低温部のみに現れる様子が示された。空気熱源と比べた冷房・暖房用熱源としてのポテンシャルは冬季に比べ夏季の方が大であった。したがって、夏季の温度条件と放熱量について数種類の条件を与えたときの鉛直方向流速分布から、上記のマクロモデルに組み込む特性式を検討した。具体的には、比較的高温になる放熱面直上の自然対流部とそれ以外の自然域に分けたときの境界面からの流入量に着目し、マクロモデルの計算格子(数10cm)程度の高さ毎に密度等をパラメータとした関数とした。

H29年度は実験とCFD解析により、貯留水中に放熱を与えるときの拡散過程を検証し、自然対流を簡便に表現する方法を検討した。実験は三重大学が所有する温度成層型蓄熱槽を用いて行った。深さ1.8mのうち下半分を約15、上半分を約25として夏季の温度成層を再現し、底部からヒーター加熱を与えたときの垂直温度分布をヒーター直上および周辺部で観測した。ヒーター直上部の温度分布より、境界面高さは徐々に上昇する様子が確認された。これは、上昇流が周囲流体と同じ温度になった時点で密度差による駆動力はなくなるものの、慣性力により高温層を浸食することによる。上層部の温度は5h後にもほとんど変化がなかったことから、温度成層の条件下では放熱の影響は低層部のみに及ぶことがわかった。これらの現象は過去の垂直実験モデルでも見られたが、今回のように放熱範囲を水平方向にも広げた実験においても実証されたことは一定の意義がある。さらに、CFD解析により自然対流の面的な評価を行った。上昇流は境界面高さに到達後、水平方向へ流れ出し、周辺部では水平方向に温度分布は見られなかった。また、上昇流は放熱面より狭い範囲に発生し、特に中心部で高温になる傾向が見取れた。従来の性能予測方式では、水体全体に排熱を均等に分散していたが、自然対流を考慮する場合は上昇流と周辺部それぞれについて高さ毎に重み付けをする方法が適すると考えられ、本研究では、そのような自然対流の面的な評価方法として、TDR(受熱量比)マップを作成した。

H30年度は過去2年間のCFD解析や実験結果に基づき、運転や停止による熱源温度の変動を簡便かつ高精度に計算するモデル(マクロモデル)をTRDの概念を適用して構築した。熱源温度の計算に必要なパラメータである混合層厚さと放熱器直上の受熱量は成層強度から推定した。実測および実験値と比較したところ、放熱時、非放熱時のいずれにおいても、マクロモデルの計算結果に妥当性が認められた。続いて、マクロモデルを用いて放熱量や放熱密度を変更したときの熱源温度についてケーススタディを行った。その結果、貯留水容量1m³当り30W以下程度の放熱量であれば、熱源利用による温度上昇は最高でも1程度にとどまり、高効率運転が可能だけでなく、自然環境への影響も小さいことがわかった。仮に1万m²の貯留水の1/4を熱源として利用することを想定すると、約400kWのピーク負荷を賄えると予想された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

- 1) Ryota Tsubaki: On the texture angle detection used in space-time image velocimetry (STIV), Water Resources Research 53, pp.10908-10914, 2017(査読有)

[学会発表](計11件)

- 1) 椿涼太: 河川河床近傍の多地点・連続モニタリング技術開発の為に基礎的研究、土木学会中部支部研究発表会、2019
- 2) 河崎啓太, 金田一清香, 西名大作, 松崎浩典, 椿涼太: 貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その12 受熱量比を用いた新たな熱源温度予測モデルの作成、日本建築学会中国支部研究発表会、2019.3(山口)
- 3) 松崎浩典, 金田一清香, 西名大作, 河崎啓太, 椿涼太: 貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その11 CFD解析による受熱特性の考察、日本建築学会中国支部研究発表会、2019.3(山口)
- 4) 河崎啓太, 金田一清香, 西名大作, 北野博亮, 岩田剛: 貯留水ヒートポンプの利用可能性に関する研究 その5 実験による自然対流の検討と受熱量比マップ、空気調和・衛生工学会大会、2018.9(名古屋)
- 5) 河崎啓太, 金田一清香, 西名大作, 北野博亮, 岩田剛: 貯留水ヒートポンプ運用時の熱源温度予測手法に関する研究 その5 大型水槽を用いた放熱実験による自然対流の挙動、日本建築学会大会、2018.9(仙台)
- 6) 河崎啓太, 金田一清香, 西名大作, 村上季実子, 北野博亮, 岩田剛, 椿涼太: 貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その10 実験値を用いた自然対流モデルの改良、日本建築学会

- 中国支部研究発表会、2018.3(広島)
- 7) 村上季実子, 金田一清香, 西名大作, 河崎啓太, 北野博亮, 岩田剛, 椿涼太: 貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その9 大型水槽を用いた放熱実験による自然対流の挙動の確認、日本建築学会中国支部研究発表会、2018.3(広島)
 - 8) 河崎啓太, 金田一清香, 西名大作: 貯留水ヒートポンプの利用可能性に関する研究 その4 CFD解析によるヒートポンプ運用時の熱的挙動、空気調和・衛生工学会大会、2017.9(高知)
 - 9) 河崎啓太, 金田一清香, 西名大作: 貯留水ヒートポンプ運用時の熱源温度予測手法に関する研究 その4 CFD解析によるヒートポンプ運用時の放熱過程と熱源温度、日本建築学会大会、2017.9(広島)
 - 10) 竹原溪吾, 金田一清香, 西名大作, 河崎啓太: 貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その8 自然対流を考慮した熱源温度計算、日本建築学会中国支部研究発表会、2017.3(島根)
 - 11) 河崎啓太, 竹原溪吾, 金田一清香, 西名大作: 貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その7 CFD解析によるヒートポンプ運用時の放熱過程と熱源温度、日本建築学会中国支部研究発表会、2017.3(島根)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 椿 涼太

ローマ字氏名: Tsubaki Ryota

所属研究機関名: 名古屋大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 80432566

(2)研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。