

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820247

研究課題名(和文)地域のエネルギー効率向上に資する新規熱源システムの開発

研究課題名(英文)Development of an energy efficient heat supply system

研究代表者

金田一 清香 (Kindaichi, Sayaka)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00396300

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)：本研究では、瀬戸内地域に点在する調整池や貯水池等の”貯留水”の持つ未利用熱を建物の空調用熱源として活用する新たなシステムの開発のため、特にその性能に対して影響が大きい”熱源温度”を予測するシミュレーションプログラムを作成した。これを用い、年サイクルでどのような運転を行うのがエネルギー消費量の削減に有効かを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To predict seasonal variations of heat source temperatures in reservoir source heat pump (RSHP) systems, we proposed a macro simulation model in which vertical and horizontal mixtures because of natural convection by heat release during RSHP operations are considered as well as heat transfer. Using this simulation model, we examined effective operation schedule for energy savings.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：未利用熱 ヒートポンプ 熱源システム 貯留水 エネルギー効率 熱源温度

1. 研究開始当初の背景

平成 24 年に施行された「都市の低炭素化の促進に関する法律」では、都市や地域、街区が全体として高いエネルギー効率で運用できるよう、必要な場所に必要だけ熱エネルギーを融通する面的利用の重要性が唱えられている。空調分野の省エネルギーにはヒートポンプの使用が有効であり、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、地域のエネルギー効率向上に寄与する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。特に地盤の場合、主たる熱移動は土壌と間隙の水や空気による伝導であり、地下水の流れがなければ見かけの熱伝導率は $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度と大きくないため、蓄熱性に対する伝導性の比である熱拡散率が低い。

他方、熱需要先の近隣に大量の「水」が存在するならば、自然対流による熱拡散性の向上が期待でき、より安定的に省エネルギーを実現できる可能性がある。現状では水を熱源としたシステムは多くないが、これには以下のような理由が考えられる。

- a) 河川水や海水の利用はシステムが大規模になるため、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、「貯留水」の利用を提案した。このとき、技術的には e) f) の克服が重要となる。自然状態での水温構造については水理学分野の研究の蓄積があり、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。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マクロな熱源温度予測を行っている。しかし、鉛直混合による熱移動を考慮に入れ、運転/停止に伴う時刻毎の温度変化を予測する手法は未だ確立されていない。

以上より、ヒートポンプからの放熱/採熱による水温構造の変化を成層の安定度と乱れの強度の観点を含め簡便に表すことができれば、新規熱源システムの評価手法として有用と考えられる。

2. 研究の目的

上記 a) ~ d) の課題をクリアする水熱源として、都市近郊に多数賦存する農業用のため池や調整地、貯水池の水(ここではまとめて「貯留水」と呼ぶ)に着目する。貯留水は一般的な湖沼に比べ、熱需要先が近くに存在する利点がある。流入/流出による交換が少ない停滞性水域であるため、河川水または海水利用システムに比べ小規模な建築物または街区の冷房/暖房用熱源として、熱交換器やコイルを通し間接的に利用することを想定する。また、将来的にはエネルギーの面的利用を行う熱供給ネットワークの一部としての機能も期待できる。

このような新規熱源システムを「貯留水利用ヒートポンプシステム Reservoir Source Heat Pump System (以下、RSHP システム)」と称し、ヒートポンプの運転により貯留水中で放熱/採熱を行うときの熱源温度を簡便かつ高精度に予測する手法を構築し、従来の空気熱源方式と比べた省エネルギー効果を評価することを目的とする。具体的には以下のことを明らかにする。

RSHP システムにおいて、貯留水の底部で放熱/採熱するときの自然対流による鉛直混合現象をモデル化する。特に、安定した温度成層が形成される夏季の放熱過程に注目する。対象とする系は、自然状態で水面が冷却されるときに発生する自然対流と同じ原理であると考え、これまでの水理学における知見を応用する。具体的には、自然対流による熱的攪乱が及ぶ範囲(「混合層」と呼ぶ)が鉛直混合により時間とともに拡大する様子を「連行則」と呼ばれるモデルで表すことができるかについて、研究方法にて後述する模型実験により混合層付

近の温度変化を詳細に測定することで検証する。

RSHPシステム使用時の熱源温度予測プログラムを構築する。まず、自然状態において夏季の温度成層と冬季の完全混合状態を再現する貯留水温度予測プログラムを作成する。次いで、同プログラムにRSHPシステムの放熱/採熱による熱授受と1.の自然対流による混合モデルを組み込み、これを熱源温度予測プログラムとする。

の熱源温度予測プログラムを用いて、様々な地域へのRSHPシステムの適用可能性を明らかにする。境界条件としては、外気温や日射量、風速等の気象条件と放熱/採熱の出力や運転時間といったRSHPシステムの運用条件を想定し、それらの結果からRSHPシステムに適した立地条件や運用方法を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は、地域の未利用エネルギーである貯留水をヒートポンプの熱源として活用するための評価手法を確立することを目的に、以下の方法により実施する。

放熱時の自然対流による鉛直混合現象のモデル化：温度成層場の自然対流は、乱れが卓越する「混合層」を基準とする代表スケールにより簡便に表される。成層安定度に対する自然対流強度の比であるリチャードソン数 Ri を用いると、混合層内での混合効率 E は「連行則」と呼ばれる $E = C Ri^{-1}$ (C : 定数) の関係で表される。大気や水域の自然状態で実証されたこの関係がRSHPシステムの放熱過程に適用できるかを検証する。

熱源温度予測プログラムの構築：貯留水温度に影響を与える要因は、a) 水面での短波・長波放射や潜熱・顕熱交換量等の熱授受、b) 短波放射の水中透過、c) 流出入、降水等の質量の授受、d) 風応力や自然対流による混合に大別できる。本研究では、RSHPシステム使用時の熱源温度を簡便な手法で予測することを目的に、a)~d)の各要素の他、e) 貯留水底部での放熱/採熱を考慮した数値計算プログラムを開発する。

貯留水の利用可能性の評価：まず、RSHPシステム運転時の熱利用ポテンシャルの算出し、貯留水のヒートポンプ

の熱源としての有用性を評価する。次いで、RSHPシステムの最適運転について考察する。

4. 研究成果

模型実験システムの構築：底面積 0.1m^2 、高さ 2m の透明塩ビ製の鉛直水中模型を作成した。中には水を充填し、夏季の温度成層相当の低温/高温の二層構造を与えた状態で、ヒートポンプからの放熱を模擬した底部からのヒーター加熱を行う際の水温変化を詳細に測定するシステムを構築した。

モデルの適用性の検討：の実験システムに、実際の運用を想定した温度条件やヒーター加熱量を与え、自然対流による鉛直混合の課程をリチャードソン数と連行係数の関係で示した。その結果、既往の研究では不明であったリチャードソン数 $100\sim 300$ の範囲についても連行則を適用できることが示された。

熱源温度予測プログラムの作成：RSHPシステム運用時のシステム性能に特に影響が大である「熱源温度」の年間変動を上記の連行則の適用により簡便に予測するプログラムを作成した。

運用条件の検討：のプログラムにより、適切な運用条件を明らかにした。具体的には、夏季に冷房、冬季に暖房を行う「基本条件」では、従来の空気熱源方式と比較した省エネルギー率は暖房期に負の値を示し、年間でもほとんど効果が現れない結果だったのに対し、冬季にも冷熱利用を行う「冷熱源利用条件」においては約 12% まで向上することが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

{ 雑誌論文 } (計 1 件)

Kindaichi, S., D. Nishina, L. Wen, T. Kannaka. Potential for using water reservoirs as heat sources in heat pump systems. Applied Thermal Engineering, Vol.76 pp.47-53. 2015 (査読有) .

{ 学会発表 } (計 9 件)

1) 甘中 大貴、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と省エネルギー効果に関する研究、日本建築学会大会、2014.9.12 (兵庫県神戸市)

- 2) 金田一 清香、西名 大作、甘中 大貴：瀬戸内地方における貯留水の利用ポテンシャルとその影響要因、日本建築学会大会、2014.9.12(兵庫県神戸市)
- 3) 竹原 溪吾、金田一 清香、西名 大作、甘中 大貴：貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その3 連行則の適用性に関する実験的検証、日本建築学会中国支部研究発表会、2015.3.8(鳥取県米子市)
- 4) 甘中 大貴、金田一 清香、西名 大作、竹原 溪吾：貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その4 成層モデルによる熱源温度予測、日本建築学会中国支部研究発表会、2015.3.8(鳥取県米子市)
- 5) 竹原 溪吾、金田一 清香、西名 大作、甘中 大貴：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1 連行則の適用性に関する実験的検証、日本建築学会大会、2015.9.4(神奈川県平塚市)
- 6) 甘中 大貴、金田一 清香、西名 大作、竹原 溪吾：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2 非定常計算モデルを用いた熱源温度予測、日本建築学会大会、2015.9.4(神奈川県平塚市)
- 7) 佐藤 秋成、金田一 清香、西名 大作：貯留水ヒートポンプシステムの熱的ポテンシャルと需要側規模の検討、日本建築学会大会、2015.9.4(神奈川県平塚市)
- 8) 甘中 大貴、金田一 清香、西名 大作、竹原 溪吾：貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その5 年間熱源温度予測と運用方法による省エネルギー性評価、日本建築学会中国支部研究発表会、2016.3.5(広島県東広島市)
- 9) 竹原 溪吾、金田一 清香、西名 大作、甘中 大貴：貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その6 CFD 解析を用いた自然対流の検証、日本建築学会中国支部研究発表会、2016.3.5(広島県東広島市)

〔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) 研究代表者

金田一 清香 (KINDAICHI Sayaka)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号 00396300