

地域の未利用熱資源を活用した空調用熱源システムの年間性能予測手法の構築

Performance prediction of an unused energy source system for cooling and heating applications

広島大学大学院工学研究科 准教授 金田一 清香

(研究計画ないし研究手法の概略)

本研究では、瀬戸内地方に多数賦存する農業用のため池や調整地、貯水池等の水（貯留水）を地域特有の未利用熱資源と捉え、これを空調用途に活用する貯留水ヒートポンプシステムの年間性能予測手法を検討する。エアコンの室外機と同様、貯留水ヒートポンプの運転時には水中に排熱を放出するため、このときの水温（以下、熱源温度と呼ぶ）が過度に上昇または下降しないように設計・運用しなければならない。特に、停滞性水域である貯留水の場合、熱交換器から放熱／採熱する際の蓄熱性と自然対流による拡散効果のバランスを鑑みて活用する必要がある。そこで、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および熱源温度を検証し、空調用エネルギーシミュレーションツールにおいて簡便に自然対流を表現する方法を検討する。

1 大型蓄熱槽を用いた放熱実験

1.1 実験環境：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。図-1に実験槽の平面図、図-2に断面図を示す。寸法は6175 mm×3110 mm×1980 mmで、後述する放熱器に対して十分に広く、水平方向への熱拡散が検討可能である。水位は1800 mmとした。天井は内側を、天井を除く5面は外側をスタイロフォームで覆われたコンクリートからなる。本実験においては、日射や風、気温といった外的要因を排除し、放熱による自然対流の挙動を観測するために、室内に設置され、かつ断熱性能を持つ実験槽を用いる。放熱器として実験槽底面に放熱密度5 W/cm²のステンレスパイプからなる、1枚当たり3 kW放熱可能な水中ヒーターを4枚並べて設置し、出力を3, 6, 9, 12 kWに変更できる。また、ヒーターには脚がついており、放熱部は実験槽底面から約0.01 m上部に保持されている。図-2のセンサーA, Bは実験に使用する温度センサーであり、それぞれステンレス製シース管の中にT型熱電対が0.1 m間隔で15点封入されている。測定点は底面から高さ0.05 m（ヒーター表面から0.03 m）～1.45 mの範囲に位置する。図-1, 2に示すように、センサーAは放熱器直上（以下、放熱器直上部と呼ぶ）、センサーBは放熱の影響を直接受けない箇所（同、周辺部）に設置した。対流への影響を低減するため、センサーの本数は必要最低限の2本に抑えた。これまでの研究により、水平方向には温度分布がほぼみられないことを確認しているため、容量の大きな周辺部にも1本のセンサーで対応可能と判断した。なお、本来自然対流の観測には流速を測定するのが望ましいが、事前の

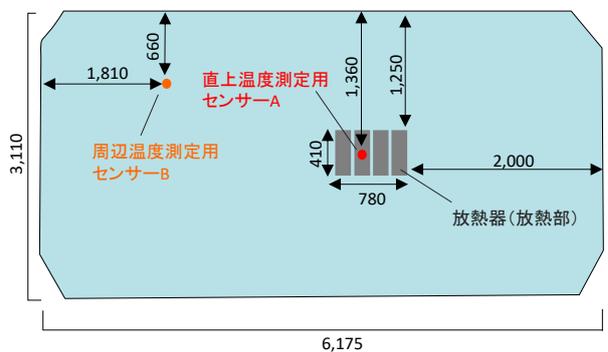


図-1 実験槽平面図

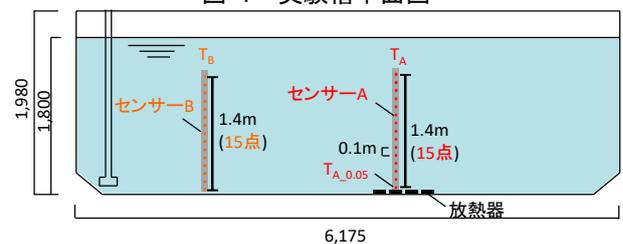


図-2 実験槽断面図

CFD解析の結果、放熱器直上の上向き流速は数cm/sのオーダーで適当なセンサーの選定が困難であることや、センサー自体が対流の妨げとなることを考慮して、今回流速は測定しなかった。

1.2 実験条件：表-1に実験条件を示す。

case2-3とcase3-2は同一の条件であるが、考察の便宜上このように示した。まず、初期温度分布について、温度成層がない場合と温度成層がある場合についてそれぞれ1条件ずつ設定した。これまでの実測で得た垂直温度分布を参考に、温度成層がない条件は11月（中間期）相当の15℃の均一な温度場とし、温度成層がある条件は8月（夏季）相当の水面近傍で25℃、底面で15℃の勾配を持つ温度場とした。また、温度成層がある条件について

表-1 実験条件

case	初期温度分布	初期境界面高さ	放熱量
case1-1	15℃	-	6kW
case1-2	15℃	-	9kW
case1-3	15℃	-	12kW
case2-1	15-25℃	0.9m	6kW
case2-2	15-25℃	0.9m	9kW
case2-3	15-25℃	0.9m	12kW
case3-1	15-25℃	0.6m	12kW
case3-2	15-25℃	0.9m	12kW
case3-3	15-25℃	1.2m	12kW

ではcase3-1～case3-3のように初期境界面高さを底面から0.6 m、0.9 m、1.2 mの3条件設定した。放熱量については6 kW、9 kW、12 kWの3条件とした。事前のCFD解析の結果より、放熱器直上で5 h後に最小でも約2℃は水温が上昇するような設定とした。本報では以上の各条件を組み合わせた計9条件を実施した。

1.3 実験方法：まず、実験槽を用いて貯留水の温度分布を再現する。温度成層がない場合はあらかじめチラーでつくった冷水と水道水を混合させて、初期条件として設定した温度の均一環境を作った。温度成層がある場合は下層部の初期水温で均一環境を作った後、底面から水を吸い上げてボイラで加熱し、実験槽上部から流入させて成層を形成した。その後、5～10分程度放置し、水の乱れを収めた。これは放熱器からの放熱以外の要因が混合に及ぼす影響を除去するためである。その後、放熱器からの放熱を開始するとともに、槽内の2ヶ所の垂直温度分布を10秒ごとに計測した。放熱器の運転時間はピーク時間帯の運転を想定し、5時間とした。

2 CFD解析の解析条件

解析モデルは実験槽を模擬し、6175 mm×3110 mm×1800 mmの直方体状の水体とした。実験で用いた水中ヒーターをモデル化し、1器あたり6つの直方体で放熱器相当の体積発熱を、実験槽モデル中央部に与えることとした。実際の実験槽は、スタイロフォームで断熱されているため、6面とも断熱境界とした。放熱器直上の垂直温度分布の評価用として、放熱器の中心部とy方向に10 mm間隔で計5点を深さ方向10 mm間隔で配置した。初期温度分布は、実験を参考に水面近傍で25℃、底部で15℃の勾配を与えた。乱流モデルとしては、放熱器周辺の水体中央部の挙動を重視し、壁面近傍は壁関数として与える標準k-εモデルを採用した。メッシュ幅は、放熱器近傍で20 mmとし、放熱器から離れるほどメッシュ幅が大きくなるよう設定した結果、総メッシュ数は306,528となった。計算時間間隔は0.4 secとした。計算負荷軽減のため対称性を利用し、計算領域は実験槽モデルの1/4とした。

（実験調査によって得られた新しい知見）

1 実験による自然対流の観測

ここでは特に温度成層のある条件について考察する。図-3にcase2-3における放熱開始後1 hごとの垂直温度分布を示す。放熱器直上部（図-3左）の温度分布より、境界面高さが経過時間に伴って上昇している様子が確認できる。この現象は、上昇流の水温が周囲流体と同程度になると密度差に

よる駆動力はなくなるものの、慣性力によって水温の高い層を少しずつ浸食することによる。上層部の温度（初期25℃）は5h後にもほとんど変化がないことから、温度成層の条件下では放熱の影響は低層部にのみ及ぶことがわかる。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。

同様に、初期の境界面高さが異なるcase3-1の結果を図-4に、case3-3の結果を図-5にそれぞれ示す。放熱器直上部、周辺部のいずれについても初期境界面高さが低いほど、すなわち放熱できる範囲が小さくなるほど水温の上昇度が大きい。また初期境界面高さが低いほど、境界面上昇が速い。これは、上昇流と周囲流体の水温差が大きい底面近傍の方が境界面に到達する際の流速が大きいために、初期境界面高さが低い条件ほど浸食が進みやすい結果であると考えられる。

図-6に、ヒートポンプの性能に影響する最下点の温度をまとめる。各条件において底面から高さ0.05 mの放熱器直上部の水温 $T_{A,0.05}$ を用いた。30分ごとの平均値を使用した。初期温度分布が同じcase1-1～case1-3、case2-1～case2-3を比較すると、放熱量が大きいほど $T_{A,0.05}$ も高い値で推移していることがわかる。放熱量が同じcase1-1とcase2-1、case1-2とcase2-2、case1-3とcase2-3をそれぞれ比較すると、いずれも温度成層のある条件の方が $T_{A,0.05}$ が高いことが見てとれる。これは、温度成層がない場合は上昇流が水面まで到達し広範囲に熱を拡散できるのに対し、温度成層がある場合は拡散範囲が境界面高さまでに制限されることによる。初期境界面高さが異なるcase3-1～case3-3を比較すると、初期境界面高さが低いほど、すなわち放熱できる範囲が小さくなるほど $T_{A,0.05}$ が高く推移するのがわかる。

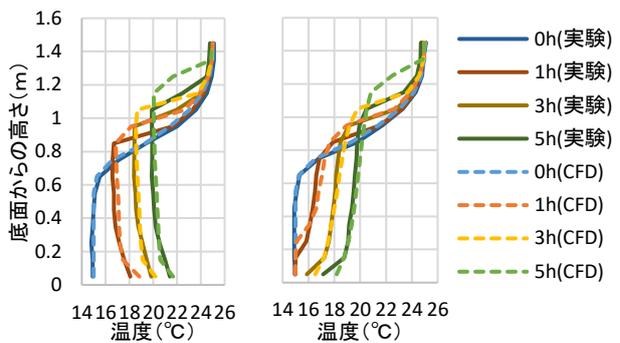


図-3 case2-3, case3-2 1hごとの垂直温度分布
(左図：放熱器直上部、右図：周辺部)
*それぞれ、CFD解析結果も併せて示す

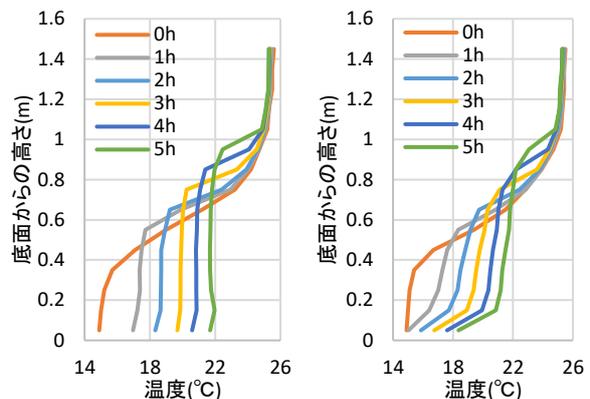


図-4 case3-1 1hごとの垂直温度分布
(左図：放熱器直上部、右図：周辺部)

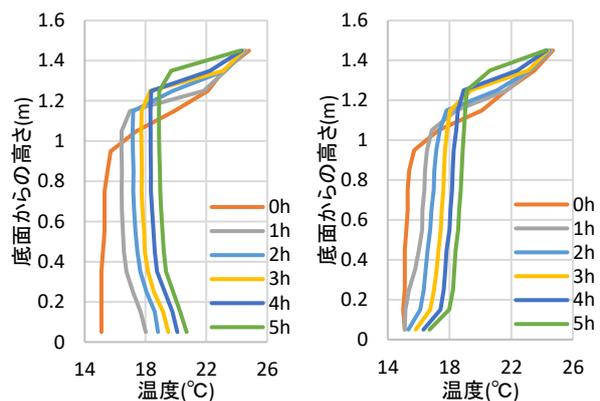


図-5 case3-3 1hごとの垂直温度分布
(左図：放熱器直上部、右図：周辺部)

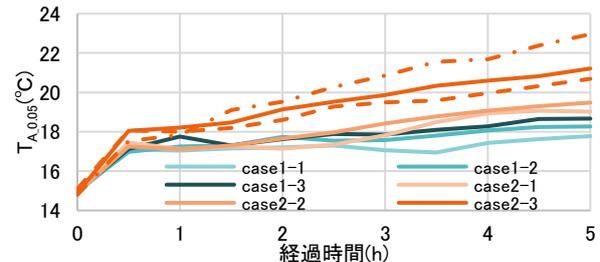


図-6 ヒーター直上の最下点温度の変化

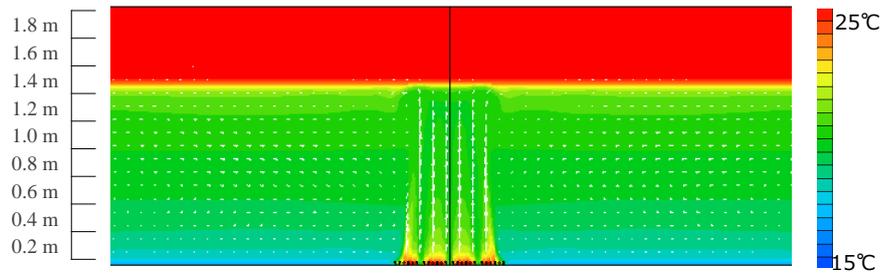


図-7 放熱開始から5 h後の水温分布と流れ (case2-3)

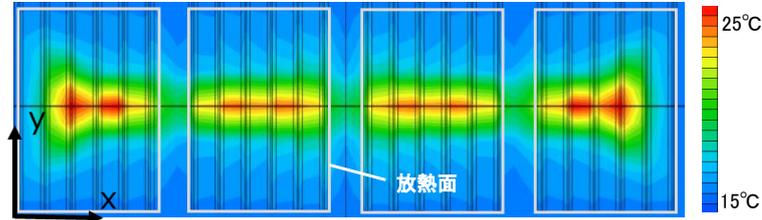


図-8 放熱器近傍の水平温度分布 (5h後)



図-9 受熱量比マップ (case2-1)

2 CFD解析による自然対流の可視化

CFD解析結果の一例として、case2-3の初期条件を与えた結果と実験結果の比較を図-3に示す。境界面の位置はCFD解析結果の方が高く現れているものの、温度分布の傾向は一致しており、温度成層がある場合については概ねよい再現性が得られた。

図-7にCFD解析におけるcase2-3の水温と流れの空間分布を示す。前者を色調で、後者をベクトルでそれぞれ示している。これより、上昇流は境界面高さに到達した後水平方向へ流れ出しており、周辺部では水平方向に温度分布がほとんどない様子が確認できる。図-8に放熱器近傍（高さ0.05 m）の水平温度分布を示す。上昇流は放熱面より狭い範囲で発生し、最高で約25℃まで上昇しているのがわかる。貯留水をヒートポンプの熱源として使用する場合、放熱器付近の温度がシステムの性能に強く影響する。Pezentらによる熱源温度の予測では、全域に一樣に排熱が拡散するとして簡易に予測されてきたが、今回の実験やCFD解析の結果から、上昇流の辺りではより高温になると予想され、システム性能を低下させる可能性がある。そこで、CFD解析と実験の結果を基に各位置の単位体積あたりの受熱量を算出し、排熱を均等に拡散する従来方式における受熱量1に対する比率（受熱量比）を算出した。図-9にcase2-1を例に作成した受熱量比マップを示す。図より、受熱量比が最大となるのは放熱器直上の高さ0.1 m付近であり、従来方式の約1.9倍の受熱量となることが示された。また、周辺部の高さ0.1 mでは約0.3となり、従来方式よりも小さい受熱量であった。

以上より、本研究では実験とCFD解析により貯留水ヒートポンプ運用時の自然対流の挙動を検討した結果、温度成層の条件下では底面からの放熱による影響は低温の低層部のみ及び様子が確認された。この低層部では自然対流により比較的高い混合状態にあると考えられるが、放熱器に近い底面近傍（高さ0.2 m以下）では周辺部に比べ放熱器直上の方が高温になり、ヒートポンプの性能に影響

響する最下点で見ると、放熱量6 kWで5 h後に約4 °C、放熱量12 kWで約6 °C上昇した。今後、空調用エネルギーシミュレーションなどにより、自然対流による拡散を考慮しながらも短時間で熱源温度の年間変動を計算する場面においては、ここで得られた受熱量比は有用な知見となるものと期待される。

(発表論文)

- 1) 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報告集 Vol. 41, 2018
- 2) 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報告集 Vol. 41, 2018