

研究成果報告書

研 究 題 目		既存建物の空調改修に適用可能な未利用熱ヒートポンプシステムの設計・運用手法に関する研究	実 施 年 度
			2024 年度
代 表 研 究 者	所 属	呉工業高等専門学校	
	氏 名	河崎 啓太	印
1. 研究の目的・背景			
空調部門のエネルギー消費量削減のために、様々な場面でヒートポンプが用いられている。ヒートポンプは冷媒を強制的に膨張・蒸発、圧縮・凝縮させながら循環させ、熱交換を行うことにより水や空気などの低温の物体から熱を吸収し高温部へ汲み上げるシステムであり、エネルギー利用効率が非常に高いことが特長である。そのヒートポンプの熱源として、一般的には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、下水などの水体や、地盤の有する熱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。地盤の恒温性を生かした地中熱ヒートポンプを採用することで、省エネ効果が得られることは既の実証されており、カーボンニュートラル化の取り組みが加速する近年、暖房負荷の大きい寒冷地を中心に採用されている。一方で、夏季の冷房負荷が大きい温暖地で地中熱ヒートポンプを長時間運転すると、地中に排熱が蓄積され高温となり、効率が著しく低下することが明らかになっている。地盤温度の上昇を改善するため、地中へ排熱せず、大気へ放熱（冷却塔の活用）させる運用に変更した事例もあるが、夏季の運転効率は冬季と比較し、大きく低下する結果となっている。したがって、温暖地における未利用熱ヒートポンプシステムの効率向上のためには、夏季の冷熱源の確保が不可欠であると考えた。そこで本研究では、瀬戸内地方に多数賦存する農業用のため池や調整池、貯水池（貯留水）を夏季におけるヒートポンプの冷熱源として活用することを提案する。貯留水の他に、温熱源としてのポテンシャルが高い地中熱や太陽熱等の未利用熱を複合利用し、従来の空気熱源方式より省エネなシステムを構築する。本システムは未利用熱とヒートポンプの間に熱源水蓄熱槽を設けており、これは従来システムにはない独自要素である。これにより、未利用熱を高効率に活用できる時間と熱負荷が発生する（空調を行う）時間の相違に対応可能となる。太陽熱を例にあげると、昼間に熱源水蓄熱槽に蓄熱、夜間に蓄熱した熱源水を利用し空調する、といった運転が可能となり、複数の未利用熱を高効率に活用できる。さらに、熱源水配管を分離でき、揚程が大きな循環用のポンプを間欠運転とすることで、ポンプ動力の大幅削減も可能とする。 貯留水の自然対流を考慮した水温予測手法は確立されていないため、本助成対象年度は、蓄熱槽内の温度予測に用いられている「プリュームモデル」を応用した熱源温度予測モデルを作成した。			

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

図1にモデルの概念図を示す。熱交換器設置高さで発生するプルーム流量 Q_i 、プルーム温度 $T_{p,0}$ は式(1)、式(2)を用いてそれぞれ算出した。式(2)における p は既の実施済みの実験結果の再現性を基に0.9と同定した。熱交換器表面温度 T_{HS} は放熱量 H_H と対流熱伝達率(熱交換器外側) h_0 を用いて、式(3)により算出した。式(3)における h_0 は式(4)により算出し、同式中のヌセルト数 N_{u0} は水平円柱に関するMorganの式に基づき、式(5)により算出した。熱交換器表面で加熱された水が、鉛直軸対称のプルームを形成すると仮定し、プルーム流量 Q_p は仮想点熱源からの高さ Z_p と浮力流束 B の関数として式(6)で算出した。浮力流束 B は式(7)で算出し、初期条件により決定する定数とした。プルーム温度 T_p は、ある高さにおける周囲流体からの連行量に起因する熱収支により算出した。プルームの上昇に伴い相対的に低温な周囲流体を連行するため、プルーム流量 Q_p は増加し、プルーム温度 T_p は低下する。プルーム温度 T_p が周囲流体温度 T_w と等しくなる高さ Z_s において、プルームの駆動力である密度差は0となるが、その後も慣性力により、プルームは周囲へ流出しながらさらに上昇し、 Z_m で停止する。この Z_m を境界面高さとし、式(8)によって算出し、高さ Z_s から Z_m のプルームにおける単位高さあたりの周囲流体への流出量(E_{out})は式(9)で算出した。周囲流体における鉛直方向の1次元熱移動は、B.Henderson-Sellersによる1次元熱移動方程式に基づき、式(10)を用いて計算した。右辺第1項の K_0 は、分子拡散相当の拡散係数($=1.4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$)を与えた。右辺第2項は水中の日射吸収を示し、単位深さ当たりの吸収熱量 q は、全日射量 ϕ_0 、水面反射率 α 、水近傍の吸収率 β 、消散係数 η 、水深 z を用いた式(11)で算出した。右辺第3項は移流による熱移動を示し、単位表面積当たりの下向き流速 U_{st} は、プルームへの連行量と流出量から式(12)により算出する。このとき、単位高さ当たりのプルームへの連行量 E_{in} は式(13)により計算される。熱交換器内水温 T_d は熱交換器設置高さの周囲水温 $T_{w,0}$ 、熱交換器の熱貫流率 U_{hex} (式(15))を用いて式(14)より算出した。水面での熱収支は全日射量 ϕ_0 、水面反射率 α 、水面近傍の吸収率 β 、水面から大気への潜熱による伝達熱量 ϕ_e 、顕熱による伝達熱量 ϕ_c 、長波長放射による伝達熱量 ϕ_{ra} を考慮した式(16)で表される。

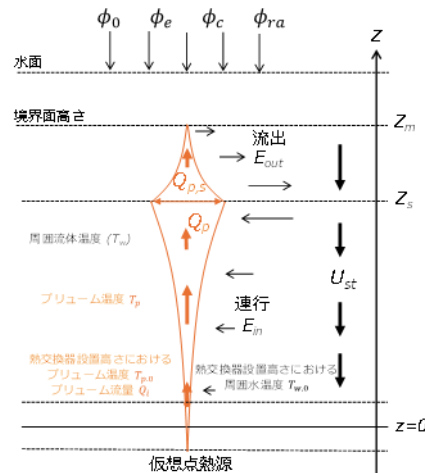


図1 熱源温度予測モデルの模式図

$$Q_i = \frac{H_H}{c\rho(T_{p,0} - T_w)} \quad (1)$$

$$T_{p,0} = pT_{HS} + (1-p)T_w \quad (2)$$

$$T_{HS} = \frac{H_H}{A_H h_0} + T_w \quad (3)$$

$$h_0 = Nu_0 \frac{\lambda}{d} \quad (4)$$

$$Nu_0 = 0.48Ra^{0.25} (10^4 \leq Nu_0 \leq 10^7) \quad (5)$$

$$Q_p = \int_0^\infty 2\pi r w dr = 0.153 B^{\frac{1}{3}} Z_p^{\frac{3}{5}} (0 \leq Z_p \leq Z_s) \quad (6)$$

$$B = \frac{gQ_i(\rho_0 - \rho_{p.in})}{\rho_0} = const \quad (7)$$

$$Z_m = 3.48 F_{do} b_0 + Z_s \quad (8)$$

$$E_{out} = -\frac{2Q_{p,s}(Z_m - Z)}{(Z_m - Z_s)^2} \quad (9)$$

$$A_{st} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ A_{st} (K_0 + K_H(z, t)) \frac{\partial T_w}{\partial z} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{A_{st} q}{c_p \rho} - U_{st} \frac{\partial T_w}{\partial z} + \frac{E_{out}(T_{p,s} - T_w)}{A_{st}} \quad (10)$$

$$q = (1 - \alpha)(1 - \beta)\phi_0 e^{-\eta z} \quad (11)$$

$$U_{st} = -\int_0^z \frac{(E_{out} + E_{in})}{A_{st}} dZ \quad (12)$$

$$E_{in} = \frac{dQ_p}{dZ} \quad (13)$$

$$0 = \frac{q_p}{A_p} \frac{dT_d}{dx} + \frac{U_{hex}}{c_p \rho A_p} (T_d - T_{w,0}) \quad (14)$$

$$U_{hex} = \frac{\pi}{\frac{1}{h_o d_o} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{1}{h_i d_i}} \quad (15)$$

$$-\frac{\partial T_w}{\partial t} = (1 - \alpha)\beta\phi_0 - \phi_s - \phi_c - \phi_{ra} \quad (16)$$

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

申請後、熱源温度計算用 PC が必要であることが判明し、謝礼金計上分から支出した。さらに、資料収集のための出張や学会への参加が必要となったため、これも謝礼金計上分から支出した。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本モデルは、地盤の境界条件を断熱としたが、実際は貯留水との熱交換が考えられるため、今後の課題とする。

実用化に向けては、貯留水の近くに冷熱需要があるかを調査する必要がある。立地条件を考慮すると、オフィスや商業施設への導入は困難だが、工場のプロセス冷却など産業用途での利用は現実的である。産業分野では未利用エネルギーの活用が進んでおり、工場排熱の再利用など温熱利用の研究は盛んである一方、冷熱利用は十分に検討されていない。したがって、今後は貯留水を産業用途のヒートポンプ熱源として活用する可能性を検討する。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

(1) 発表済

・貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その 14 貯留水ヒートポンプシステムにおける新たな水温予測モデルの開発 竹信遥稀、河崎啓太、北野博亮、金田一清香、西名大作
（日本建築学会中国支部研究発表会）2025.03.02

(2) 発表予定

・空気調和・衛生工学会 2025 年度大会 2025 年 9 月 3 日～5 日 香川大学