

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02297

研究課題名(和文) エナジーポートフォリオ管理によるハイブリッド熱源ヒートポンプの最適運用

研究課題名(英文) Operation management of hybrid heat source heat pump systems by energy portfolio management

研究代表者

金田一 清香 (Kindaichi, Sayaka)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授

研究者番号：00396300

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、未利用熱と空気熱とのハイブリッド熱源による空調用ヒートポンプシステムの設計と持続的な運用管理を一貫して行う「エナジーポートフォリオ管理」を提案し、延床面積2000 m²の事務用途建物と、広島大学東広島キャンパスの各学部建物を対象にシミュレーションを実施した。未利用熱ヒートポンプは水配管が必要になる場合が多いため、水搬送動力を含めたシステム全体での評価が重要であることから、実験システムを構築し、搬送動力や熱源の温度特性を考慮した制御方式を採用した点が特徴である。適切な設計と運用の下では、暖房時は30%～40%、冷房期は25%～35%の省エネルギー効果が持続的に得られることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、冷房需要の多い温暖地の非住宅建築物における省エネ打開策として、未利用熱と空気熱を併用するヒートポンプシステムに注目し、搬送動力を含めたシステム全体のエネルギー効率の最大化を目的に、設計段階だけでなく運用段階においても持続的に運用改善を実践する手法として、エナジーポートフォリオ管理を提案した。将来的には、中央監視システムに適用することで、設計者・施工者または現場管理者による自発的なPDCAサイクルの循環を生み出すことを目指しており、後の再生可能エネルギー社会への転換に向けた一方案として、政策や実社会への波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed the Energy Portfolio Management method for hybrid heat source heat pump systems with ground sources (GSHP), reservoir water heat sources, and air sources (ASHP), which supported consistently from design to operation phases. We developed water flow control methods depending on heat loads based on experiment data to achieve high system performances including pumping power. A case study in Hiroshima University indicated that hybrid heat source heat pump system may continuously provide energy saving effects of 30-40% in the heating period and 25-30% in the cooling period compared to conventional air-cooled heat pump systems under adequate design and operation. The variable water flow control is effective to save energy especially in buildings which have relatively large pumps to deliver heat source water far from the buildings.

研究分野：建築設備

キーワード：エナジーポートフォリオ管理 ヒートポンプ 未利用熱 地中熱 貯留水

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

空調用ヒートポンプの熱源として現状最も多く用いられる大気中の熱(空気熱と呼ぶ)に比べ、地中熱や河川・海水・湖沼水等の水が保有する熱(未利用熱と呼ぶ)の活用は進んでいない。特に温暖地の冷房過多条件での未利用熱活用を対象とした事例は少なく、またほとんどが未利用熱源の容量選定や年間性能の予測等、主に設計・計画段階でのケーススタディを行うものであり、運用段階において実際の負荷状況を踏まえ、未利用熱源を持続的かつ高効率に活用するための手法は未だ確立されていない。一般に、実運用時の冷暖房負荷が設計値と乖離することはよく見られる事象だが、従来の空気熱の単独方式では能力不足とならない限り、運用上の問題はほとんどなかった。しかし、未利用熱を併用する場合、負荷の大小に加え、インバータの容量制御や台数制御の方法等、様々な要因によって生じる設計との誤差が熱源に蓄積し、例えば20年後には熱源温度の変化やシステム性能の低下を引き起こし、恒常的に使えなくなる危険がある。

以上より、温暖地での未利用熱の積極的な活用に向け、空気熱との共存の中で実効性の高い熱源システムとなるよう、設計から運用段階まで一貫して管理できる手法が必要と考えた。

2. 研究の目的

本研究では、未利用熱と空気熱とのハイブリッド熱源による空調用ヒートポンプシステムの設計と持続的な運用管理を一貫して行う「エネルギーポートフォリオ管理」を開発する。これにより、ケーススタディとしての性能予測・評価の枠を超え、汎用性の高い未利用熱の活用指針の確立が可能となる。将来的には、中央監視システムに適用することで、設計者・施工者または現場管理者による自発的なPDCAサイクルの循環を生み出し、真に再生可能なヒートポンプシステムの創造につなげることが目標である。

3. 研究の方法

本研究は以下の手順および方法で実施した。

- (1)未利用熱源の特性評価：瀬戸内地方を含む温暖地の主要都市を対象に各未利用熱源の物性値の収集および自然温度の分析を行った。地中熱については、拡張アメダス気象データに付属する土壌熱物性値データベースおよび広島大学での実測値により、不易層温度(地表面の熱授受の影響を受けない深部の温度)や熱伝導率を評価した。貯留水については、数値シミュレーションおよび広島大学に隣接する角脇調整池の実測値により評価した。
- (2)ハイブリッド熱源のシステム性能に関する実験的検討：水熱源式は、ヒートポンプ動力のみでは空冷式より高効率であることが知られているが、水搬送動力を含めたシステム全体での効率としては大差がないという知見もあることから、水熱源ヒートポンプチラー(WSHP)と空冷ヒートポンプチラー(ASHP)(それぞれインバータ搭載、機器容量6kW程度)からなる中央式熱源システムを模擬した実験システムを構築し、システム性能を検証した。WSHPには深さ約50mのボアホール型地中熱交換器を接続し、地中熱ヒートポンプとして用いることとした。
- (3)ハイブリッド熱源ヒートポンプシステム統合システムシミュレーション：汎用のシステムシミュレーション(LCEM ツールを使用)をベースとして、ハイブリッド熱源に対応した年間シミュレーションプログラムを構築した。
- (4)エネルギーポートフォリオ管理の実践：(3)のプログラムを用いて、設計条件としてWSHPとASHPの機器容量の比率、運用条件としてWSHPとASHPの運転順位、熱源水ポンプの制御方法、冷却塔による放熱併用の有無を設定し、エネルギーポートフォリオ管理を実践した。

4. 研究成果

- (1)未利用熱源の特性評価：図1に、広島大学近郊での外気温と地中熱・貯留水の各熱源温度の年間変動の例を示す。負荷条件や設計によるものの、全体的な傾向として、夏は貯留水、冬は地中熱が有用であることが示された。また、広島大学における熱応答試験の結果、地盤の不易層温度は16.9℃、有効熱伝導率は2.74 W/m/Kであることを把握した。
- (2)ハイブリッド熱源のシステム性能に関する実験的検討：図2に示す実験システムを構築した。特に、WSHPの熱源水ポンプの搬送動力を考慮し、システム全体の電力消費量を最小とする制御条件を検討した。一般に、熱源水流量の低流量化は水搬送動力低減に寄与するが、適切な流量で運転されなければ、熱源水

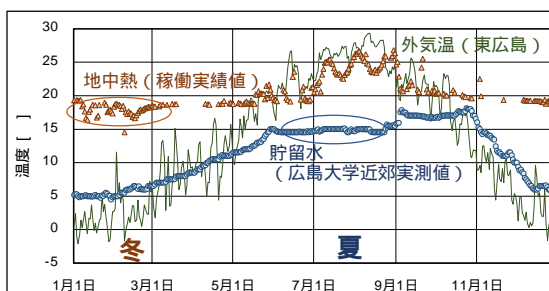


図1 熱源温度比較の例



図2 実験システム外観

表 1 運用条件の設定

| | |
|-------|-------------------------|
| Case0 | 常にGSHP1位、ASHP2位(基本条件) |
| Case1 | 外気温<25°Cの時ASHP1位、GSHP2位 |
| Case2 | 夏期(5~10月)ASHP1位、GSHP2位 |

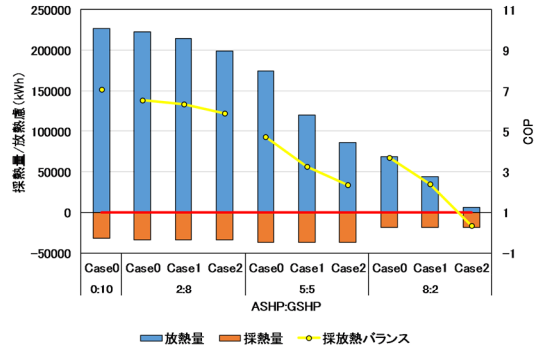


図 3 熱源温度比較の例

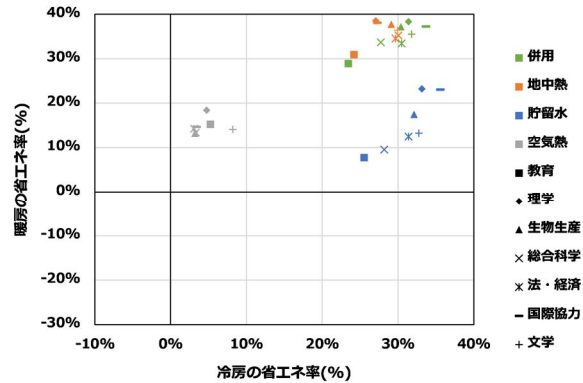
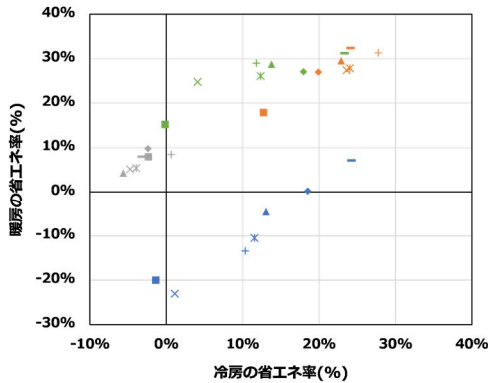


図 4 空冷方式と比較した場合の冷房期と暖房期における省エネ率
(左図：定流量制御、右図：変流量制御)

の出入口温度差の拡大に伴い、熱源水出入口平均温度(以下、温度ポテンシャル)が低下し、ヒートポンプの効率低下を引き起こす可能性がある。よって、本研究で定義したヒートポンプの効率低下の指標である温度ポテンシャルを流量条件、負荷条件、運転モードによって比較することによって変流量条件を求めた。結果として、冷房期はヒートポンプの負荷率 30% (定格能力に対して 30%の出力)、暖房期は負荷率 50%の条件で、熱源水流量を定格流量に対して 50%で運転した場合、システムのエネルギー性能が向上する様子が示された。

(3)貯留水利用時の年間シミュレーションの構築：(1)(2)の結果を基に、ハイブリッド熱源に対応した年間シミュレーションプログラムを構築した。

(4)エネルギーポートフォリオ管理の実践：空気熱 - 地中熱ハイブリッド熱源システムについて、エネルギーポートフォリオ管理の実践を試みた。広島市の気象条件に対し、延床面積 2000 m²の事務用途建物の主要居室にハイブリッド熱源ヒートポンプシステムを適用することを想定した。熱負荷条件は外気負荷のみの場合、外気負荷に外皮負荷を加えた場合、さらに全ての室負荷を加えた場合を考え、それぞれ WSHP と ASHP の機器容量の比率を 11 条件変更してポートフォリオを作成した。運用条件では、WSHP と ASHP の運転順位、地中熱の熱源水ポンプの制御方法、冷却塔による放熱併用の有無により、年間エネルギー効率(AEE)や熱源温度の変化度を示す熱源サステナブル指数(HSI)は強く影響される様子が示された。特に、温暖地の非住宅建物において重要な事項として、暖房に比べ冷房の負荷が過多で、地盤への放熱と採熱の年間バランスが悪い点が指摘され、熱源機の運転順位の変更によりこの問題が改善できる様子が示された(表1、図3)。ここでの検討は空気熱 - 地中熱の組み合わせのみであったが、計 100 ケース強のポートフォリオを作成し、10年間の運用改善効果を提示することができた。

(5)エネルギーポートフォリオ管理の実践：次に、現在カーボンニュートラル化の取り組みの一環として建物の省エネルギーを検討中であり、再エネ熱の利用可能性が高い広島大学東広島キャンパスの各学部建物を対象に、エネルギーポートフォリオ管理を適用した。ここでは、設計条件は WSHP と ASHP の機器容量は 1:1 に固定し、地中熱、空気熱、貯留水をそれぞれ単独熱源として利用した場合と比較した。運用条件としては、(3)の実験により得た制御条件を適用した変流量条件と、従来の定流量条件を比較した。水搬送系を含めたシステム全体で見ると、貯留水の熱源水ポンプの設備容量が比較的小さい学部では、併用ケースが最もエネルギー性能が高かったのに対し、貯留水の熱源水ポンプの設備容量が比較的大きい学部では地中熱単独のほうが高性能となった。図4に、従来の空冷式に対する省エネルギー効果を示す。熱源水ポンプの設備容量が大きいケースでは、定流量制御では空冷式に対して増エネとなり、変流量制御を行うことで、すべてのケースでプラスの省エネ効果となることが示された。本研究で対象とした空調負荷に対しては、水搬送系の適切な制御により各熱源が持つ熱源温度特性によるヒートポンプの効率向上効果を最大限生かすシステムを構築できる可能性が示唆された。キャンパスに導入した場合、各学部において暖房時は 30%~40%、冷房期は 25%~35%の省エネルギー効果となり、年間の空調用電力消費量を約 33%削減できる可能性が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Sayaka Kindaichi, Keigo Takehara, Daisaku Nishina | 4. 巻 185 |
| 2. 論文標題 Applicability of entrainment law to heat release processes in reservoir-source heat pump systems | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering | 6. 最初と最後の頁 1-8 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.applthermaleng.2020.116428 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 車木幸貴・金田一清香・西名大作 |
| 2. 発表標題 ハイブリッド熱源ヒートポンプシステムのシステム特性に関する実験的検討 第3報 地中熱ヒートポンプシステムの熱源水流量制御に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 井手智大・金田一清香・西名大作 |
| 2. 発表標題 温暖地における地中熱ヒートポンプの運用改善と性能変化に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 兵頭恭介、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 温暖地におけるヒートポンプシステムの地中熱と空気熱の熱源構成に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 車木幸貴、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 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6年間運転特性の検討 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 兵頭恭介、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 温暖地におけるハイブリッド熱源ヒートポンプシステムに関する研究 (第2報) 地中熱ヒートポンプシステムの熱源水流量制御による省エネルギー効果の検証 |
| 3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 車木幸貴、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 温暖地におけるハイブリッド熱源ヒートポンプシステムに関する研究 (第1報) 地中熱と空気熱の熱源構成に関する検討 |
| 3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 井手智大、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 ハイブリッド熱源ヒートポンプシステムのシステム特性に関する実験的検討 (第1報) 暖房運転における負荷処理割合とエネルギー性能の関係 |
| 3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 車木幸貴、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 ハイブリッド熱源ヒートポンプシステムのシステム特性に関する実験的検討 (第2報) GSHPの熱源水流量とエネルギー - 性能の関係 |
| 3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 兵頭恭介、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 温暖地における地中熱ヒートポンプシステムの運用手法に関する研究 その4 ハイブリッド熱源システムにおける部分負荷効率向上に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 兵頭恭介、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 温暖地における地中熱ヒートポンプシステムのサステナブル運用に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 兵頭恭介、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 温暖地における地中熱ヒートポンプシステムの持続的運転手法に関する研究 |
| 3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 田中亜実、金田一清香、西名大作、兵頭恭介 |
| 2. 発表標題 ヒートポンプシステムにおける地中熱と空気熱の熱源構成に関する検討 |
| 3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 兵頭恭介、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 温暖地における地中熱ヒートポンプシステムの運用手法に関する研究 その3 冷却塔の併用による10年間の性能予測 |
| 3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 車木幸貴、金田一清香、西名大作 |
| 2. 発表標題 貯留水の熱的利用可能性に関する研究 その13 貯留水HPにおけるサステナブル性能の検証 |
| 3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

| | | | |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織 | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|