

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19360407

研究課題名（和文） 地下水流動を考慮した群杭を用いた季節間蓄熱システムの実用化

研究課題名（英文） Application of seasonal heat storage system using clustered energy piles with consideration to groundwater flow

研究代表者

藤井 光 (FUJII HIKARI)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80332526

研究成果の概要（和文）： 地中熱利用システムでは、効果的な蓄熱によりエネルギー効率の大幅な向上が可能である。本研究では福井市中心部に設置した、群杭蓄熱を用いた地中熱利用融雪システムにおいてフィールド試験および数値シミュレーションを行い、同システムの高い省エネルギー性を実証した。さらに、同システム設置適地の抽出を目的として、福井平野における地下水フィールド調査および広域地下水流動モデリングを行い、同平野における地中熱利用適地マップを構築した。

研究成果の概要（英文）： In geothermal heat pump (GeoHP) systems, energy efficiency can be drastically improved with the application of well-designed heat storages. In this research, field tests and numerical simulations were carried out in a GeoHP snow-melting system with clustered heat exchange piles in Fukui City, Japan and the high energy-saving ability of the GeoHP system was successfully demonstrated. Field-wide surveys and numerical modeling of groundwater flow system in the Fukui Plain were also performed to develop a suitability map of GeoHP system in the area.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2008年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	12,400,000	3,720,000	16,120,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：

1. 研究開始当初の背景

地中熱利用システムは地盤の恒温性に起因する大気と地盤の温度差を利用して、冷暖房や融雪を行う技術であり、化石燃料を使用す

る場合や空気熱源空調と比べてエネルギー効率(=出力/投入したエネルギー)が高く、省エネルギー効果が顕著である。また、同システムは冷房時に大気に排熱を放出しない

ため、ヒートアイランド現象抑制効果が高く、今後の普及が期待されている。温帯に位置するわが国では、地中熱利用システムにおいて冷暖房運転が交互に繰り返されるため、夏期の温熱を冬まで、あるいは冬期の冷熱が夏まで保存する季節間蓄熱が可能となれば、冷暖房や融雪において大きな省エネルギーが実現される。

従来の地中熱利用システムでは、採熱や排熱を行う地中熱交換杭は相互干渉しないように5m程度離して設置されており、地中に蓄えられた熱は春や秋のシステム運転休止期間に周辺地盤に拡散するため、季節間蓄熱は不可能と考えられていた。しかしながら、地中熱交換杭の配置をより密に設計することにより、夏期の蓄熱や冬期の冷熱蓄熱により地盤中に熱塊や冷熱塊を形成することができれば、ヒートポンプを用いずにきわめてエネルギー効率の高い空調や融雪が可能と考えられた。しかしながら、大規模な群杭を用いた季節間蓄熱システムの設置例は国内外において見られず、フィールド試験によるデータ収集・解析や同試験結果に基づくシミュレーションモデルの構築は本システムに実用化にきわめて重要と考えられ、本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、2006年から2007年にかけて福井市内に設置された季節間蓄熱システムシステムを対象として、同システムの実用化を目指した検討を行なうことを目的とした。季節間蓄熱システムは福井市中心部に位置する足羽川橋梁、管設備業組合駐車場、および福井平野末端部の新清永橋の3箇所に融雪を目的として設置され、杭間隔は1.5m~1.6mである。これら季節間蓄熱システムにおいては、夏期の蓄熱運転および冬期の融雪運転時におけるデータの収集と解析を行ない、運転挙動やエネルギー効率について検討した。また、群杭および周辺地盤を含む数値シミュレーションモデルを開発し、実運転データを用いたヒストリーマッチングにより妥当性を検証した。そして、同モデルを用いた様々な感度計算を行い、季節間蓄熱システムの設計諸元の最適化を目指した。

また、福井平野を始めとする沖積平野では、地下水湧出地域では地下温度が高いことが判明しており、平野全体の地下水流れの構造を明らかにすることは、季節間蓄熱の技術を普及させる上で重要と考えられた。そこで、本研究では福井平野における観測井、民間の井戸、湧水などを対象に温度測定および水質分析のための採水を実施し、様々な水質分析を行った。得られたデータをベースとして福井平野における地下水流動系の広域数値シミュレーションモデルを構築し、季節間蓄熱

システムの運転挙動のモデリングの解析の基礎データとすることを目指した。さらに、同数値モデルを用いて福井平野における地中熱利用適地マップを構築し、同システムが高效率で運転可能な地域の選定を行なった。

3. 研究の方法

(1) 福井市内における季節間蓄熱システムの蓄熱運転データの収集と解析

足羽川橋梁(熱交換杭378本、長さ23m)、管設備業組合駐車場(熱交換杭36本、長さ17m)、新清永橋(熱交換杭36本、長さ38m)にそれぞれ設置された季節間蓄熱を用いた融雪システムにおいて、以下の測定を行った。

深度5m間隔の地中温度、地下水位を運転開始前より研究終了時まで長期計測した。

熱交換杭における出入口水温と流量、システム全体における消費電力などを連続的に計測した。

(2) 福井平野の地下水流動系モデリング

地下水涵養源となる山地を含む福井平野全域において、以下の研究項目を通して涵養域から流出域に至る地下水系の解明とモデリングを行った。

対象地域における観測井、民間の井戸、湧水および河川水を対象に温度測定および水質分析のための採水を行なった。温度測定はデジタルサーミスタ温度計を用い、深度2m間隔で測定した。

水質分析は現地にて水温、pH、電気伝導率(以下EC)を、実験室にて主要溶存成分(陰イオン: F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , 陽イオン: Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})を行なった。酸素・水素安定同位体比に関しては外注作業により分析した。

得られたデータは地図上にコンターなどで取りまとめ、水文環境図を作成した。

地質情報、フィールドにて測定した地下水位等に基づいて自然状態シミュレーションを行い、福井平野における地下水流動系を再現した。

地下水流動系モデルに地層熱物性を入力し、地下水の温度分布を計算した。計算結果をフィールド測定結果と比較し、岩種に応じた熱物性値を決定した。

地下水流動系モデルより得られた地下水流速分布図、地下温度分布図に基づいて地中熱交換能力の分布を推定し、福井平野における地中熱利用適地マップを作成した。

(3) 微地形や河川水の影響の解析

足羽川河川敷の季節間蓄熱システムにおいて以下の調査と検討を行なった。

河川堤防、河川敷部分に10m程度の観測孔を掘削し、地下水位計を設置することにより、システム設置位置周辺での水位変化を長期

計測した。

得られた地下水位分布に基づき、システム設置位置周辺の地下水流速・流向を推定した。

(4)季節間蓄熱の数値シミュレーションモデルの開発

これまでの研究で構築した地中熱利用システムを対象とした数値シミュレーションソフトに、群杭を用いた季節間蓄熱を組み込むための修正を行ない、上記3箇所の季節間蓄熱システムの運転において得られた地中温度・熱交換杭内水温データを用いて妥当性を検討した。

4. 研究成果

本研究にてモニタリングおよびデータ解析を行った管設備業組合駐車場および新清永橋の季節間蓄熱を用いた融雪システムはともに平成18年12月より運転を開始し、また足羽川橋梁における同システムは平成20年2月に完成し、運転を開始した。これに伴い、それぞれのシステムにおいて地中温度分布・杭出入口水温・流量地下水位(足羽川橋梁におけるシステムのみ)の連続計測を開始した。足羽川橋梁における蓄熱システムでは、蓄熱後の地中温度が最も高い9月中旬において群杭中心部では36に達し、アスファルト路面にて採取した夏期の太陽熱が効果的に蓄熱されていることが示された。融雪運転開始直前の11月中旬においては熱の拡散により、群杭周辺部の地盤温度は約10低下したが、群杭中心部の熱は35と保持され、本システムの高い蓄熱効果が示された。地下温度の変化の観察によると、蓄熱後の熱塊の地下水流れによる移動は見られず、本研究にてモニタリングを行った地点における地下水流動が蓄熱システムの挙動に与える影響は小さいことがわかった。また、測定データを用いた分析より群杭を用いた融雪システムは蓄熱を行なわない同システムと比較して杭本数が少なく済み、初期投資が押さえられるため、単位融雪面積当たりの(初期コスト+50年間運転コスト)の縮減効果が20,000(円/m²)以上ときわめて大きいことがわかった。次に得られた運転データと数値シミュレーション結果とのヒストリーマッチングを行なった。気象データを入力として算出されたシステム運転挙動は実測値と良好に一致し、構築した数値シミュレーションモデルの妥当性が示された。そして、同モデルを用いた感度計算により以下の知見が得られた。

- 最適な杭間隔は1.5m程度である。
- 蓄熱時のOn/Offは杭内水温に基づいて制御することが重要である。

- 融雪面において流れ方向を30分間隔で反転させることにより雪の融け残しを減らすことができる。
- 路面舗装に高熱伝導率を示す珪石骨材を使用することにより、融雪効率が向上する。

さらに、同モデルを用いて日本各地における気象データに基づく融雪システムの適用性について検討を行ない、本システムが様々な気象条件下において高いエネルギー効率を示すことを確認した。

上記の季節間蓄熱システムに関する研究と並行して、福井平野における広域的地下水流動系を解明し、同システム設置適地を選定するための地下水フィールド調査を2007年から2008年にかけて計4回実施した。フィールド測定では、消雪用深井戸、地盤沈下観測井、一般家庭用浅井戸、湧水、河川を対象として地下水位を測定し地下水面図を得た。深井戸では2m間隔で地下水温度測定を行って鉛直温度プロファイルを得た。測定された地中温度より、福井平野における浅部地盤の温度勾配および地下温度は平野中心部に向かってに従い増加していることが明らかとなり、地下水は平野周辺部から中心部に向かって流動していると推定された。また、一般水質分析より得られたトリリニアダイアグラムおよび同位体分析結果より、福井平野の地下水は比較的滞留時間が短く、平野部にも涵養域があることが示された。

続いて地下水調査結果に基づき、地下水流動・熱移流シミュレーションソフトFEFLOWを使用して福井平野全域を対象とした広域的な3次元地下水流動・熱移流シミュレーションモデルを作成した。広域シミュレーションモデルより得られた地下水位及び鉛直温度プロファイルは実測データと精度良く一致し、モデルの妥当性が示された。次に、福井平野における地中熱利用適地を選定するために、広域的地下水流動系モデルの一部を切り出すことにより、福井平野における10m x 10m x 50mの局所シミュレーションモデルを作成した。局所でモデルは福井平野中心部の地質および地下水条件が異なる13地点において作成し、これら地点における熱交換量予測計算を実施した。熱交換量は採熱のみを行う融雪運転ケース、および採熱排熱の両方を行なう空調運転ケースについて予測し、10年間経過後の熱交換量をコンターマップにまとめることにより熱交換量マップを作成した。これと並行して、広域地下水シミュレーションモデルより得た福井平野全体の地下

水流速，温度の分布および福井平野の土地利用状況，地質等の情報を地理情報システム(GIS)により統合することにより，同平野における地中熱利用システム設置適地マップを作成した。両者の比較の結果，熱交換量マップと地中熱利用システム設置適地マップは近似した傾向を示すことがわかった。

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15件)

Fujii, H., Okubo, H., Itoi, R. (2007) Interpretation of Thermal Response Tests in the Presence of Groundwater Flow, Geothermal Resources Council Transactions, 査読あり, Vol.31, 465-470.

Fujii, H., Inatomi, T., Itoi, R., Uchida, Y. (2007) Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport modeling, Geothermics, 査読あり, Vol.36, 459-472.

宮本重信, 竹内正紀, 永井二郎, 菅原 桂一郎 (2008) 熱交換杭群を用いた合成鋼床版橋での季節間蓄熱融雪の一設計, 土木学会論文集 G, 査読あり, Vol.64, 10-25.

永井二郎, 宮本重信, 西脇昌哉, 竹内正紀 (2008), 放熱管埋設路面融雪の数値シミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 査読あり, Vol.74, 640-647.

N.Nagai, T.Tsuda, S.Miyamoto (2008) Demonstration and Optimal Design Condition of Snow-Melting System using Geothermal Energy, Proc. the 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Sapporo, 査読あり, CD-ROM, 1-2.

Fujii, H., Ohyama, K., Okubo, H., Itoi, R. (2008) Application of Ground Source Heat Pumps for Air-conditioning of Greenhouses, Proc. Renewable Energy 2008.

石上孝, 藤井光, 糸井龍一 (2008) 基礎杭を利用した地中熱利用冷暖房融雪システムのシミュレーションモデル構築と地中熱交換量の検討, 日本地熱学会誌, 査読あり, Vol.30, 271-280.

Okubo, H., Fujii, H., Itoi, R., Chono,

M., Ohyama, K., Chou, N., Narita, S. (2008) Prediction of long-term performance of ground source heat pump in greenhouses, Proc. Int. Symposium on Earth Science & Technology 2008, 査読あり, 99-108.

N.Nagai, S.Miyamoto, M.Nishiwaki, M.Takeuchi (2009) Numerical Simulation of Snow Melting on Pavement Surface with Heat Dissipation Pipe Embedded, Heat Transfer - Asian Research, 査読あり, Vol.38, 313-329.

N.Nagai, S.Miyamoto, T.Tsuda, S.Yamahata (2009) Experimental Demonstrations and Optimal Design Conditions of Snow-Melting System using Geothermal and Solar Energy, Proc. the ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference, San Francisco, 査読あり, CD-ROM, pp.1-5.

大久保博晃, 藤井光, 糸井龍一 (2009) 同軸型地中熱交換器の室内モデル実験および数値モデリング, 日本地熱学会誌, 査読あり, Vol.31, 51-62.

Fujii, H., Okubo, H., Nishi, K., Itoi, R., Ohyama, K., Shibata, K. (2009) An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers, Geothermics, 査読あり, Vol.38, 399-406.

Nishi, K., Fujii, H., Okubo, H., Kariya, T., Chou, N. (2009) Numerical modeling of horizontal ground heat exchangers, Proc. Int. Symposium on Earth Science & Technology 2009, 査読あり, 327-332.

Komaniwa, Y., Fujii, H., Chou, N., Okubo, H. (2009) Possibility for cost reduction of geothermal heat pump system by improving heat transfer characteristics of buildings, Proc. Int. Symposium on Earth Science & Technology 2009, 査読あり, 321-326.

藤井光, 駒庭義人, 山口雅登, 長直勝 (2010) 非充填 U 字管型熱交換井におけるサーマルレスポンス試験解析, 日本地熱学会誌, 査読あり, Vol.32, 31-40.

[学会発表](計10件)

永井二郎, 地中熱源利用の融雪・空調の開発 - 現状と課題 -, 日本伝熱学会東海支部・北陸信越支部合同企画 東海・

北陸信越伝熱セミナー，岐阜県高山市，2007年9月。

與田佑季，藤井光，内田洋平，宮本重信，福井平野の地下水流動に関するフィールド調査，日本地熱学会学術講演会，2007年11月，つくば市。

津田亨・永井二郎・宮本重信，地中熱を利用した季節間蓄熱・融雪システムの開発（システム最適設計の検討），日本機械学会北陸信越支部第45期総会・講演会，福井市，2008年3月。

N.Nagai, T.Tsuda, S.Miyamoto, Demonstration and Optimal Design Condition of Snow-Melting System using Geothermal Energy, 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Oct., 2008, Sapporo.

西啓太，藤井光，石上孝，藤原和弘，地中放熱の土壌内生態系への影響調査のための地中温度数値シミュレーション，日本地熱学会学術講演会，2008年11月，金沢市。

與田佑季，藤井光，内田洋平，宮本重信，地中熱利用最適化のための地下水流動解析，日本地下水学会秋季講演会，2008年11月，福岡市。

山端信也・永井二郎・宮本重信・山崎三知朗，地中熱・太陽熱を利用した融雪システム - 実証試験と最適設計条件検討 - ，日本機械学会北陸信越支部第46期総会・講演会，富山市，2009年3月，N.Nagai，S.Miyamoto，T.Tsuda，S.Yamahata，Experimental Demonstrations and Optimal Design Conditions of Snow-Melting System using Geothermal and Solar Energy, ASME 2009 Heat Transfer Summer Conf., Jul., 2009, San Francisco.

内田洋平，與田佑季，藤井光，宮本重信，吉岡真弓，地下水流動・熱輸送解析とGISを用いた地中熱利用適地マップの作成，日本地熱学会学術講演会，2009年12月，京都市。

吉岡真弓，内田洋平，與田佑季，藤井光，宮本重信，地下水流動・熱輸送解析を用いた熱交換量マップの作成，日本地熱学会学術講演会，2009年12月，京都市。

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 光 (FUJII HIKARI)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：80332526

(2) 研究分担者

内田 洋平 (UCHIDA YOUHEI)
産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・主任研究員
研究者番号：90356577
永井 二郎 (NAGAI NIROU)
福井大学・工学部・准教授
研究者番号：70251981

石井 武政 (ISHI TAKEMASA)
産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・グループ長
研究者番号：00356429

糸井 龍一 (ITOI RYUICHI)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：50108768

(3) 連携研究者

宮本 重信 (MIYAMOTO SHIGENOBU)
福井県雪対策・建設技術研究所・総括研究員

研究者番号：20470156