

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26850150

研究課題名(和文) ヒートポンプ地中熱利用融雪装置における熱交換井の採熱特性

研究課題名(英文) The properties of geothermal heat exchanger for snow melting system without heat pump

研究代表者

森谷 慈宙 (MORITANI, Shigeoki)

弘前大学・農学生命科学部・助教

研究者番号：30539870

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)：これまで、ボーリングマシンを使わずにパワーシャベルを使った回転埋設型の鋼管杭を熱交換井として用いる方式を確立した。しかし、弘前大学で熱交換井の埋設を試みたが、地盤が固いため4m深までしか掘削できず、十分な地中熱が得られなかった。同時に研究過程でエアコンを水冷式に改造して性能評価を調べていったところ、地下水のように一定熱源温度が保たれば寒冷地でも高いCOPが期待できた。このヒートポンプシステムをイチゴのベンチ栽培に適用した。GHEの深さがベンチ長に対して十分ではなかったため、鋼管杭内の水温は大きく増加したが、栽培環境を十部冷却していることが認められた。

研究成果の概要(英文)：The method for setting up ground heat exchanger (GHE) has been established with a solid-bottom steel cylinder by drilling via rotation with a downward pressure loaded with a hydraulic excavator. Outdoor and indoor units of 1-kW commercial air-conditioners were converted to water source units in both the condenser and the evaporator unit, respectively. The heat pump supplies cooling water from the evaporative unit to the media container in which the strawberry grows while the heating coil in the condenser unit is cooled by circulating water through the GHE. Considering the high water temperature of the heat exchanger tank of the heat pump system, the length of the heat exchange well was insufficient for the extraction of sufficient geothermal energy in this experiment. However, the converted heat pump and facile establishment of wells achieved cooling of the 4 benches effectively and at a reasonable cost.

研究分野：農業工学

キーワード：地中熱 熱交換井 ヒートポンプ COP

1. 研究開始当初の背景

東北地方、とりわけ青森県は寒冷で積雪が多いことから、交通の利便性を妨げ、またハウス栽培を困難にさせる。除雪費用では県の予算を圧迫しており、2011年度では38億円を計上した(青森県, 2012)。また冬のハウス栽培では、全園芸施設面積の28%しか利用されておらず、加温熱源の70%を石油に頼っている。これら冬の厳しさを打開するためには、低コストな融雪舗装や加温ビニールハウスの研究開発が必要不可欠である。

その中で、弘前市では2012年に地中熱を利用した融雪装置を普及させるプロジェクトが立ち上がった。現在、路面や駐車場などで広く普及している融雪装置は、灯油を燃料とした循環温水や電熱線によるものである。これら融雪装置に比べて地中熱利用型はランニングコストが小さい。通常、熱交換井には、50-100m深度までボーリング後、ポリエチレン製などのUチューブが埋設されていることが多い。積雪は、人間の快適な温度環境とは異なり、路面温度が数度あれば十分溶かすことができる。冬季における深さ数メートル以深の地温は青森県で13°C前後であり外気温よりも暖かい。この暖かい地温を、不凍液などの媒体を介して地上まで運べればヒートポンプでの融雪は可能である。そこで、本研究ではまず、熱交換井のみによる熱交換を行い、融雪や栽培環境の改善を試みる。

2. 研究の目的

地中熱を利用した融雪装置は、雪国で多く使われている灯油を燃料とした装置よりもランニングコストが低い。従来のボーリング型融雪装置は、ヒートポンプの設置や熱交換井のためのボーリング工事によって初期投資が高額になるため、一般家庭への普及が遅れている。これまで、ボーリングマシンを使わずにパワーシャベルを使った回転埋設型の鋼管杭を熱交換井として用いる方式を確立した。しかし、弘前大学で熱交換井の埋設を試みたが、地盤が固いため4m深までしか掘削できず、十分な地中熱が得られなかった。そこで、本研究では熱交換井の代わりに井戸水を用いてヒートポンプの熱源とした。

ヒートポンプ暖房は室内用エアコンに使われているが、高い初期投資により農業利用ではほとんど用いられていない。特に地下水を用いたオープンループ方式は、平成25年で累計201件のみである。クローズド式は1301件

と多いが、地中深さ50-100mまでボーリングを行い熱交換であるUチューブを埋設するため、初期費用が高い。地下水の賦存量は地域性が強いが、青森県弘前市では10mまで掘れば多量に採水可能である。

ヒートポンプはCOPが高く、ランニングコストが低い。ほとんどのハウスで見られている暖房器は重油式である。しかし重油は年間変動が大きく、平成26年1月では1Lあたり96.4円であったが、平成28年では57.6円となっている(日本エネルギー経済研究所)。ヒートポンプが農業適用への足かせとなっているのは、高い初期投資に加えて、ヒートポンプを導入した場合、ランニングコストがどれくらいなのか十分な試算がないためだと思われる。そこで本研究ではヒートポンプを使った場合、ランニングコストが重油の場合と比べてどのくらいのメリットがあるのかについて試算を行った。

3. 研究の方法

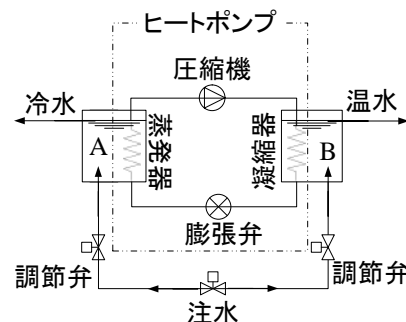


図1 ヒートポンプ実験

ヒートポンプは定格消費電力1kWの市販エアコンを分解したものをを用いた(図1)。凝縮器および蒸発器の環境温度を変化させるため、タンクAとB内に下方から水道水を注水し、調節弁により注水速度を制御した。タンクには、熱交換器を十分浸すことができる高さに排水口を設置し、注水による過剰水を上方から排水させた。周囲を断熱材で覆うことによりタンクからの放熱は最小限にした。タンク水と熱交換器が十分熱交換できるように、運転時は常に水中ポンプによりタンク水を循環させた。

加熱(W_H)または冷却能力(W_C)は、注水温 T_{in} (°C)と排水温 T_{out} およびタンク水温 T , タンク水容量 V (kg), 注水速度 q ($kg\ s^{-1}$), 水の比熱 C ($kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)から求めた。COPは、冷媒(R410A)が循環する銅配管に接地した熱電対を用いて、凝縮・蒸発器温度・圧縮機吐出温度・過冷却度・加熱度を測定・計算し、モリエル線図によ

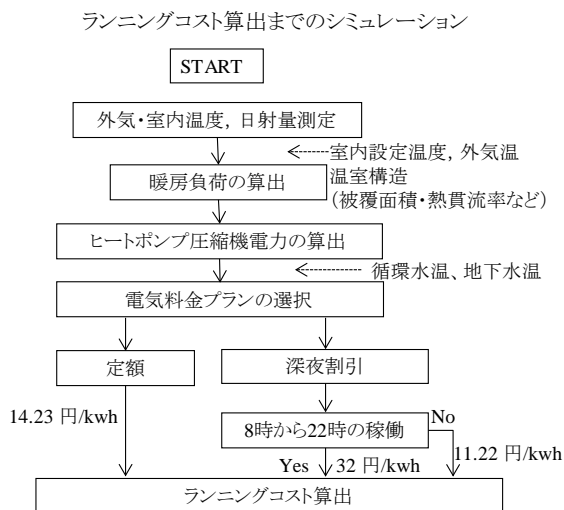


図 2 ランニングコスト算出までのプロセス

り求めた。また、冷媒蒸気を圧縮するのみに要する圧縮動力 P_C は COP と W_H により算出した。圧縮機効率 η は、圧縮機における消費電力計の値を P_C で割ることにより求めた。加熱能力算定のシミュレーションは図 2 に沿って行った。 COP と η は、凝縮器水温(T_H)と蒸発器水温(T_C)の 2 変数として近似し、それぞれ、 COP_{EST} および η_{EST} とした。

時刻 $i+1$ におけるタンク水温 (T_{i+1}) は Heshmat (2003) を引用し、エネルギー保存則により次の式(1)に変形させて推定した。

$$T_{(H\ or\ C)}^{i+1} = \left(T_{in} + \frac{W_{(H\ or\ C)}}{q \times C} \right) - \left(T_{in} + \frac{W_{(H\ or\ C)}}{q \times C} - T_{(H\ or\ C)}^i \right) \exp\left(-\frac{q}{V} \Delta t\right) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 Δt は時間ステップ(s)であり、 H と C はそれぞれ凝縮器と蒸発器側を示す。 COP 測定はヒートポンプ各所に取り付けた温度センサーの実験値とモリエル線図により求めた。また圧縮機における消費電力量のモニタリングを行った。ヒートポンプから得られた両タンクの熱量は、タンク水温と循環水の流速・温度からエネルギー収支式により計算した。圧縮機効率は、これら熱量とモリエル線図から得られた COP 等から求めた。ヒートポンプの稼働シミュレーションを行う際に、タンク水に与えられた熱量の推定が必要となる。そこで、ここでは凝縮・蒸発器のタンク水温から COP および圧縮機効率を算出するための経験式を実験値から求めた。

ランニングコスト算出にあたり、ヒートポンプ内の暖房負荷量が必要になってくる(図 2)。暖房負荷量は青森市における 2015 年度冬季の気温および日射量データ(気象庁)を用いた。また温室の床面積は 468m^2 、暖房設定温度を 20°C とした。ランニングコスト算出では、上記の暖房負荷量に対する圧縮機電力の算出を行い、料金プラン等考慮して求めた。重油

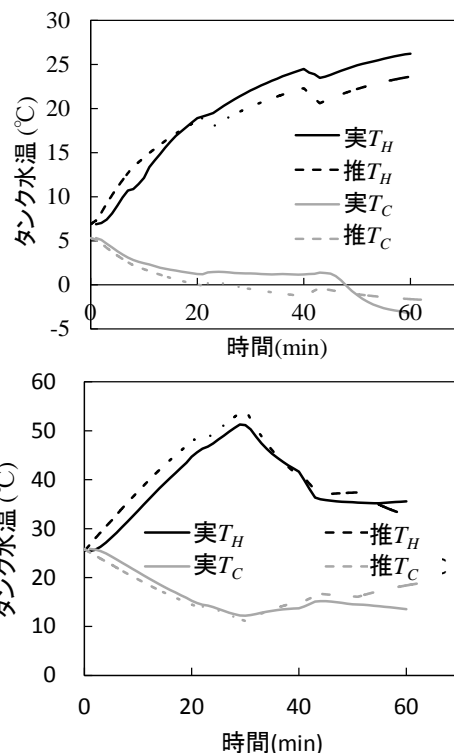


図 3 タンク水温のシミュレーション結果
上: 連続注水(a), 下: 30 分後から注水(b)

式暖房器を対照区とし、単価を 81.3 円/L として計算を行った。

4. 研究成果

図 3 は凝縮・蒸発器のタンク水温の推定値と実測値である。60 分に 3 回ほどヒートポンプが自動停止したため、図中の水温は停止に応じて応答している。20 通りほど、循環水の流速や初期水温等変化させたが、いずれのケースにおいても推定値と実測値がよく合致した。

10 月から翌年 5 月にかけて暖房を稼働するとして、図 2 から求めたランニングコストの算出を行った。同時に昼間を重油、深夜電力が適用可能な夜間にヒートポンプを稼働させるハイブリッドに対しても計算を行った。その結果、HP 暖房の場合、重油暖房機に比べて 45 万円程コストが低下した。さらにハイブリッド型温風機の場合、暖房期間中で 100 万円を切り、対照区の重油暖房機に比べて 60 万円もコストカットできた。長期的な観点で見れば、HP 暖房を取り入れた方が安くなり、10 年間で初期投資が回収できるという結果になった。これら結果は、重油の単価を高めて計算を行った場合だが、昨年度の単価 50 円/L 前後と比べても、ハイブリッドの方が低いランニ

ングコストを示した。

今回は冬季の暖房稼働のみについてシミュレーションを行ったが、夏季ではヒートポンプによる冷房が可能である。例えば、高温条件に適さないイチゴに対して真夏に冷房を行えば、増収が見込める。このことから、冷房・暖房の年間ランニングコストと作物収益も考慮に入れた試算を今後、行っていく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

① Moritani S, Nanjo H, Itou A, Partial cooling of strawberry plant by water tube utilizing geothermal heat pump. *Journal of Applied Horticulture*, 19 (3), 186-190. 2017. 査読あり)

② Moritani S, Yamamoto T, Andry H, Saito H, Evapotranspiration and Mineral Content of *Sedum kamtschaticum* Fischer Under Saline Irrigation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 48, 12, 1399-1408. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1358743>, 2017 (査読あり)

③ K. Sasaki, C. Sasaki, C. Kato, A. Endo, T. Annaka, S. Moritani, N. Matsuyama: Studies on reducing Cadmium uptake of paddy rice (*Oryza sativa* L.) by both soil dressing and mixing tillage. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 7-1, pp.6-14, 2016 (査読あり)

④ Moritani S, Yamamoto T, Andry H, Sasaki C, Kato C, Saito H (2016) An Attempt to Use High Salinity Water for Irrigating a Green-Roof Garden. *International Society of Environmental and Rural Development*, 7(1), 97-103, 2016. (査読あり)

⑤ Thuyet DC, Saito H, Saito T, Moritani S, Kohgo Y, Komatsu T, Multivariate analysis of trace elements in shallow groundwater in Fuchu in western Tokyo Metropolis, Japan. *Environ Earth Sci* 75:559 DOI 10.1007/s12665-015-5170-4, 2016 (査読あり)

〔学会発表〕(計3件)

① 森谷慈宙・荒木将太・南條宏肇, 施設栽培におけるヒートポンプ加熱能力の推定, H29 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 140-141, 2017.

② 森谷慈宙・宮内晴規・藤巻晴行・石田祐宣, 施設栽培における太陽光パネルを用いた灌漑計画の検討, H29 年砂丘学会全国大会要旨集, (新潟大学), 2017.

③ 森谷慈宙・伊藤重貴, 雪害による枝折れ防止を目的とした支柱の最適位置の検討, 農業農村工学会全国大会講演会 (仙台市), 2016

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

①名称: 融雪システムおよび鋼管部

発明者: 南條宏肇・森谷慈宙

権利者: 弘星テクノ (株)

種類: 特願

番号: 2014-83089

出願年月日: 2014

国内外の別: 国内

※2017.7.4 未審査請求によるみなし取下

○取得状況 (計1件)

①名称: 地中熱融雪槽

発明者: 南條宏肇・石田祐宣・森谷慈宙

権利者: 弘星テクノ (株)

種類: 実願

登録番号: 実用新案登録第 3194187 号

登録年月日: 2014.10.15

国内外の別: 国内

6. 研究組織

研究代表者

森谷 慈宙 (MORITANI, Shigeoki)

弘前大学・農学生命科学部・助教

研究者番号: 30539870

