

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05895

研究課題名(和文) 地下水熱源CO₂ヒートポンプによるハウス加温システム開発に向けた基礎的研究研究課題名(英文) Fundamental research of CO₂ heat pump assisted with geothermal energy for heating system in greenhouse

研究代表者

森谷 慈宙 (Moritani, Shigeoki)

弘前大学・農学生命科学部・准教授

研究者番号：30539870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：温水循環によるハウス内の培土温のコントロールを念頭に、高いシステムCOPを有する農業用給湯器の効率的稼働に関する研究を行った。COPは熱力学をベースにした解析解により求め、一般的なソフトウェアの解と程よく一致した。その結果、農業利用の特殊条件下においても応用計算でき、高い精度でCOPを求めることができた。次に、温度管理システムが異なる各種コンテナ培地において、イチゴの培地温度制御を行った。その結果、限りなく断熱密閉したコンテナ培地において、より効率的な温度制御が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒートポンプの農業利用において、冷媒熱力学を考慮したCOP計算を行った例は少なく、より理論的なCOPシミュレーションが期待できる。同時に冷媒COP計算に用いる係数は、実験結果を基にして得られており、文献毎に異なる値を示している。また、有効数字10桁におよぶ場合もあり、農業利用においてどこまで厳密な値を採用したらいのかといった知見が少ない。本研究の結果から、実用的なCOP計算について検討することができた。

研究成果の概要(英文)：Ground-source heat pumps (GSHPs) have been used to chill water to facilitate cooling of strawberry grown within containers during the summer. Two types of soil containers and cooling systems have been considered. The cooling efficiency of each system was evaluated by calculating the coefficient of performance (COP) from observed temperatures. Simple equipment for measuring COP requires a basic thermodynamics approach and many coefficients of the gas state equation and saturated liquid line equation are affected by factors such as pressure, temperature, and volume. The coefficients used in these equations vary depending on the literature. In this study, the influence of a change in the coefficients on the precision of the COP calculation was examined.

研究分野：地域環境工学

キーワード：ビニールハウス加温 地中熱ヒートポンプ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

施設園芸の暖房費は、作物や地域により大きくばらつくが経営費に対して 30%を超えており、燃料源の 90%以上を石油が占めている(農林水産省, 2016)。国際情勢により大きく乱高下する原油価格を考慮すると、エネルギー源の多様化が進んでいる電気を使った方がより安定的で持続的な営農ができる。一方、地中熱ヒートポンプによる施設栽培システムは、省エネ電気機器を利用していることから国の補助制度があるものの、普及率が 1%にも満たない。この理由として、地下 50-100m 程に亘る熱交換井の掘削工事費やヒートポンプ価格が高い、ことが挙げられる。申請者はこれまで、掘削コストを抑えたまま採熱効率を高めた埋設型鋼管杭の開発に携わった。しかし、礫層を多く含む場所での本法では、掘削能力に限界があることも課題として残された。一方、地下水は寒冷地でも 15 程の水温を保っており、施設園芸の灌漑用水として大半利用されている。このため、地下水熱源によるヒートポンプは、空気熱源よりも COP(成績係数)が高い。さらに熱交換された水媒体を還元井へ逃がすため、地中熱利用で使われている熱媒体クローズド方式よりも高い採熱量が可能である。そこで、安価な家庭用エアコンを改造して空気から水熱源の変換を図り、地下水を蒸発器に循環させるシステムを開発してきた。同時に、ヒートポンプにより温度制御した循環水をパイプに通して、作物の根圏や生長点周りを局所的に温度コントロールする技術についての開発を行ってきた。

ハウス内の加温法は、重油による温風機が 90%以上を占めている(日本施設園芸協会, 2015)。一方、温水パイプ加温では、局所暖房が行いやすく、重油ボイラーによる 50-60 程度の温水を利用しているケースが多く見られる。そこで、本研究では 55 の温水パイプを栽培環境周辺に配置させて空気を暖め、40 にまで冷えた温水パイプを土壤に埋設する、シンプルな加温法を採用する。これまで、R410A 冷媒を用いたヒートポンプ実験から、50 程度の温水が得られており、熱源水温 10 に対して圧縮機効率を含めた COP は 2.9 と高い結果が得られている(業績 2)。しかし改造エアコンを用いたため、温度センサーによる自動制御が動き 55 以上の温水製造までには至らなかった。また、空冷式熱交換器をそのままタンク水に浸潤させて簡易的な水冷式とした。このため、水と冷媒との熱交換を促進する必要があることから、タンク内に水中ポンプを設置して強制対流を生じさせたため、余分な消費電力が発生した。以上より、エアコン改造では、本研究の目的とする地下水熱源ヒートポンプ給湯器に到達するまでの技術的課題が多い。そこで本研究における学術的課題は、農業用ヒートポンプ給湯器が市場にほとんど普及されていない状況を考慮し、「コスト削減を見据えつつ、地下水熱源ヒートポンプ給湯器の技術的課題をクリアした農業用給湯器の開発」とする。

2. 研究の目的

100 近くまでの温水製造ができるヒートポンプ給湯器は、一般家庭用を中心に自然冷媒 CO₂ を用いたものが普及してきており、市場価格も随分と低下した。本研究では、廉価な CO₂ ヒートポンプ給湯器をベースにハウス加温システムの構築を図る。

CO₂ 冷媒は、圧縮機により超臨界域まで達する。超臨界域において、CO₂ は液体と気体の中間状態を保ち、熱伝導性では液体のように高く、熱交換器内の冷媒圧力損失に関しては気体のように低い。また凝縮器内では、圧力一定を保ったまま、冷媒温度は水との熱交換により低下していく。この現象は、超臨界域において特別であり、通常の気液状態では冷媒温度は一定である。この冷媒温度の減少作用を利用すれば、1 方向に低温水を流すことにより、冷媒温度の低下に従って水温が増加するため、高い熱交換率での温水製造が可能である。水と熱交換した冷媒は膨張弁を通り、蒸発器内で空気から熱を奪う。冷媒理論 COP は、圧縮仕事に対する加熱能力である。冷媒理論 COP の最大値は、熱源温度と熱利用設定温度で決まってくる。このため、今後いくら技術の進歩があっても、理論上それを超えることはない。一方、システム全体の COP は、(1)圧縮機効率の低下や、(2)熱交換器における冷媒の圧力損失、等の原因により冷媒理論 COP よりも低下する。本研究では、(1)・(2)に関する技術的課題を克服し、高いシステム COP を有する農業用給湯器の開発を行っていく。

3. 研究の方法

地中熱ヒートポンプによりベンチ栽培の冷却を行った。処理区は、チューブ方式と培土下面から冷却水を与えた 2 つの処理区とした。チューブ方式ではチューブ周りの培土を同心円状に熱伝導により冷却していくのに対して、下面給水方式では、熱伝導と熱移流による 2 つの現象が同時に生じる。このため、下面給水方式では冷却効果が高かった。しかしこの方式は、培土下部の通水溝からの漏水が生じる可能性があることから、正確な設計の下、ベンチを設置していく必要がある。その反面、チューブ方式は施工が比較的簡単であることから、初期投資コストやどのぐらいの冷却効果を期待するのかなどについて、事前の検討により選択していく必要がある。

4. 研究成果

地下水熱源を想定したヒートポンプの COP 予測を行った。冷媒はこれまで行ってきた R410A を対象とした。冷媒における圧力 - エンタルピー関係図における各状態量は、文献などを参考にして飽和液線や飽和蒸気線などの経験式を基に計算を行って求めた。また、蒸発熱はクラペイロークラウジウスの式、過熱蒸気における状態方程式は Martin-Hou 式を用いた。COP の予測では、凝縮器における過冷却度および蒸発器における過熱度が既知で一定で、エントロピー一定の断熱圧縮過程を前提とした。過熱蒸気では、状態方程式において体積 V と温度 T が圧力 P の陰関数になっていることから、ニュートン法を用いて V, T を求めた。実測した 350 個程のデータを基に、COP 計算ソフト(日本冷凍空調学会)と比較した結果、COP の誤差が 0.09 とほぼ同じ値を示し、計算で用いたファクターなどの妥当性が裏付けられた。

冷媒 COP の推定について検討を行った。推定式は、熱源と利用温度を変数とした 14 個の係数を用いた。これら係数は、実験結果を基にして得られており、文献毎に異なる値を示している。また、有効数字 10 桁におよぶ場合もあり、農業利用においてどこまで厳密な値を採用したらいいのかといった知見が少ない。そのため、今回は係数の変化に対する COP の精度について考察を行った。係数を -10% から 10% 一律に変化させた結果、+2% を超えると COP の絶対誤差が 1.0 を上回ったが、マイナスに変化させた場合は -10% においても絶対誤差が 0.79 と少ない値を示した。どこまでの誤差を許容するかは別途考えていく必要があるが、 $\pm 0.2\%$ 内であれば誤差が 0.1 以下に収まった。また、COP 算定において、冷媒の気液両相を含む全流体域に対しても成立するヘルムホルツ自由エネルギーのひとつの関数形で表現する基礎状態式の導入を試みた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Moritani Shigeoki, Saito Hiroataka, Win Pyone Win, Kohgo Yuji	4. 巻 12
2. 論文標題 Assessment of potential groundwater contamination by ground source heat pump operation using solute transport models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Energy and Environmental Engineering	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40095-020-00360-2	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 Moritani Shigeoki, Akahira Akira	4. 巻 41
2. 論文標題 Influence of Parameters on the Estimation of Coefficient of Performance for R410a Refrigerant	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Thermophysics	6. 最初と最後の頁 1~17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10765-020-02699-4	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 Moritani Shigeoki, Tahei Yamamoto, Sukthai Pongpattansiri, Chuleemas Boonthai Iwai, Anusorn Bunpok	4. 巻 1
2. 論文標題 Design of Green Roof Application with Gray Water in Tropical Area	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management	6. 最初と最後の頁 432-439
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 Moritani, S., Sasaki K., Itaka K.	4. 巻 70
2. 論文標題 Development of low-cost evaluation method for coefficient of performance of heat pump for heating greenhouses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environment Development and Sustainability	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10668-019-00518-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Moritani S, Nanjo H, Itou A, Imai T	4. 巻 28
2. 論文標題 Root-zone Cooling Evaluation Using Heat Pump for Greenhouse Strawberry Production	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 HortTechnology	6. 最初と最後の頁 570-577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 松田陸登・森谷慈宙
2. 発表標題 自動追跡カメラによる害獣対策の検討
3. 学会等名 砂丘学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野晴貴・森谷慈宙
2. 発表標題 深度推定を用いた林道の運転支援に関する研究
3. 学会等名 農業農村工学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊高健治・森谷慈宙
2. 発表標題 ソーラーシェアリング用日射シミュレーションプログラムの開発
3. 学会等名 日本太陽エネルギー学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森谷慈宙・澤田祐亜・金藤正直
2. 発表標題 ビニールハウス内における野菜育成の環境自動制御
3. 学会等名 砂丘学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森谷慈宙・鈴木雄大・伊高健治
2. 発表標題 栽培施設におけるLED 照明の配置設計
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018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
研究 分 担 者	石山 新太郎 (Ishiyama Shintaro) (60355021)	弘前大学・理工学研究科・教授 (11101)	

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
---------	---------