

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450354

研究課題名(和文) ゼロエネルギー低温貯蔵庫の開発

研究課題名(英文) Development of a zero energy cool chamber

研究代表者

森本 哲夫 (MORIMOTO, TETSUO)

愛媛大学・農学研究科・教授

研究者番号：50127916

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：電気をほとんど使わない青果物のゼロエネルギー低温貯蔵庫を開発した。冷却法は水の蒸発を最大限に利用した気化冷却と太陽熱駆動型吸着式氷蓄熱冷却システムである。前者は庫内の壁と床に多孔性の溶岩プレートと保水性のある天然ゼオライトを使用し水で湿らすことで外気より10℃ほど低下できた。後者は冷媒としてメタノールを用い、それを活性炭で吸着させること、そして管内を低圧にすることで冷媒の気化を促進させ冷却する。これにより蒸発器は-10℃まで低下し、3.5kg/dayの氷を作ることができ、氷水の循環で庫内を低温に維持できた。

研究成果の概要(英文)：This study developed a zero-energy cool chamber (ZECC) with a solar-driven adsorption refrigerator that does not use electricity. It consists of a solar collector containing activated carbon as an adsorbent, a condenser and an evaporator. It cools water based by evaporating methanol and adsorbing it on activated carbon, and then makes ice. The methanol adsorbed on the activated carbon is desorbed by applying solar heat. The ice is then used to cool the storage space. During evaporation of methanol inside the evaporator at adsorption phase, the evaporator temperature reduced to -10 °C that triggered the transforming process of liquid water to solid ice. We obtained about 3.5kg ice per day. The water evaporative cooling system also cools the storage space by evaporating water from the wet walls containing wet filler. The combined use of two cooling systems reduced the average inside temperature and extended the shelf life of tomatoes from 7 to 23 days.

研究分野：植物環境制御学

キーワード：省エネ 太陽熱利用 活性炭素繊維 吸着式冷却 青果物貯蔵

## 1. 研究開始当初の背景

最近、震災に伴う脱原発の観点から、電力不足が懸念され、省エネ志向がかなり強まっている。とくに、青果物の貯蔵分野では冷蔵庫等の冷却等に多くの電力消費を伴うので、この傾向が強い。

そこで本研究では、新素材および新技術を活用して、電気をほとんど使わないで青果物を低温貯蔵できるゼロエネルギー低温貯蔵庫を開発する。

図1は本研究で提案するゼロエネルギー低温貯蔵庫である。電気を使わない冷却法として2つの方法をとる。1つ目は水の蒸発を最大限に利用した気化冷却である。これは、壁や床の材料として、多孔性で蒸発面(比表面)の大きい溶岩プレートと湿潤性の優れた天然ゼオライトを用い、そこを水で湿らせ、主に自然対流で、そして定期的なファンによる強制的な通風で冷却する。さらに、壁(充填材)と床を湿らすための水供給およびファンによる送風は、最適化手法を用いて、庫内温度が最低となるように最適制御する。

2つ目の冷却法は、メタノール(冷媒)と活性炭素繊維(吸着材)を活用した新しい吸着式冷却法である。図2はその冷却の概略図である。メタノールを入れた容器Aと活性炭素繊維を入れた容器Bをパイプで繋いで密閉し、内部を低圧(真空)にする。そうすると、容器Aではメタノールが常温で蒸発し冷却される。このとき、蒸発したメタノールは容器Bの活性炭素繊維で能動的に吸着されるので、蒸発が促進される。次に、吸着したメチルアルコールは、太陽熱により活性炭素繊維から脱着させ、それを水で冷やして液化し、もとの容器Aにもどす。このプロセスを繰り返すと、容器Aは冷却部としてはたらく。

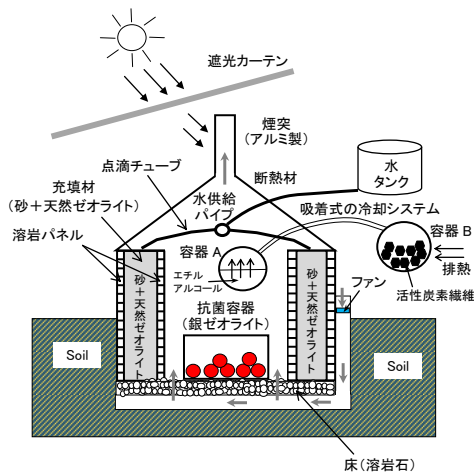


図1 ゼロエネルギー低温貯蔵庫の概略図

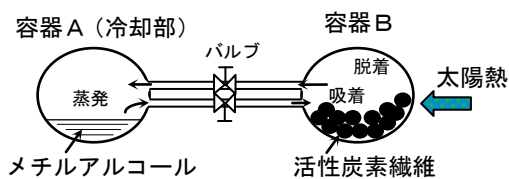


図2 吸着式冷却法の概略図

一方、本研究における熱移動や温度の解析法は、非常に複雑なので、ニューラルネットワークの学習によるモデル化、そして遺伝的アルゴリズムによる最適値の探索法を用い、庫内温度が最低となるように最適制御する。

また、本方式では水供給により庫内の湿度は高くなり、カビ等が発生しやすくなる。このため、抗菌剤(銀イオン等)を塗布した収納容器を作成する。

また、青果物自体にも40~50℃の熱ストレス処理を施して、鮮度および品質をできるだけ長く保持する。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、新素材と新技術、さらに最適化手法を活用して、また青果物自体にも熱ストレス処理を施して、電気をほとんど使わないで青果物を低温貯蔵できるゼロエネルギー低温貯蔵庫の開発を行うことである。

## 3. 研究の方法

壁や床の材料としてはレンガ、溶岩プレート(20×20×2cm, 30×30×2cm, 大光産業製)、溶岩石を用いた。また、2重壁の充填材としては砂と天然ゼオライト(0.25~1mmφ, あるモール製)を混合して用いた。

吸着式冷却システムの冷媒はメタノール、吸着剤は活性炭(破碎状 粒径:4~10メッシュ、ナカライテスク)と活性炭素繊維(デキシーシート、ユニチカ)を用いた。銅管は、配管用(凝縮器含む)で16mmφ、太陽熱集热器内の銅筒で40mmφのものを用いた。

散水による気化冷却の最適化問題として、ニューラルネットワークと遺伝的アルゴリズムを活用した知的最適化法を用いて、壁充填材(砂と天然ゼオライト)への水供給操作(操作量)により庫内の温度(制御量)を最低にする制御を行った。

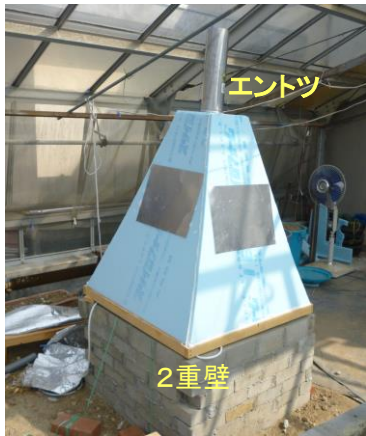
## 4. 研究成果

### (1) ゼロエネルギー低温貯蔵庫の試作

図3は、試作したゼロエネルギー低温貯蔵庫全体の写真であり、太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システム(試作)を備える。それは低温貯蔵庫と太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システムから成る。(b)は低温貯蔵庫部の写真である。内部は図1のようで、貯蔵庫は1m<sup>3</sup>ほどの貯蔵空間、冷却と断熱のための2重壁(レンガと溶岩プレート)と溶岩石を敷き詰めた床、床下からの送風システム、発泡スチロール製の三角屋根(遮熱塗料塗布)、空気自然対流を促すための煙突(アルミニウム製)、遮光カーテン、そして散水による気化冷却システムから成る。2重壁は主に多孔性の溶岩プレートを用いて水の浸潤と拡散で気化冷却を促進させた、またレンガも用いた。2重壁の間に入れる充填材は砂と天然ゼオライトの混合材を用い、壁の水分保持と浸潤をはかった。設置場所は、外気温の影響を少なくするため、下半分程度を地下に設置した。



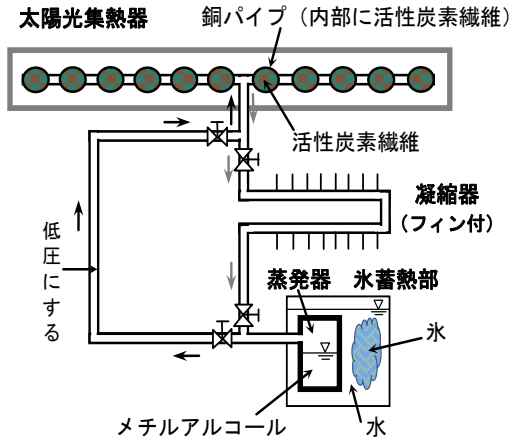
(a) 全体  
(太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システム含む)



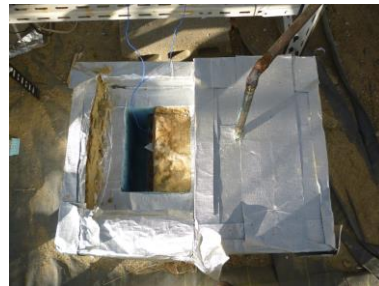
(b) 低温貯蔵庫

図3 試作したゼロエネルギー低温貯蔵庫

図4 (a)は太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システムの概略図である。太陽熱集熱器、蒸発器、氷蓄熱部、凝縮器から成る。(b)は蒸発器と氷蓄熱部、(c)は太陽熱集熱器、(d)は凝縮器である。この太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システムの稼働は、夜間にメタノールを活性炭に蒸発させて冷却し氷をつくる。昼間は氷水を循環させて庫内を冷やすとともに、太陽熱で活性炭繊維からメタノールを脱着させ、凝縮器で冷やして液体に戻す。



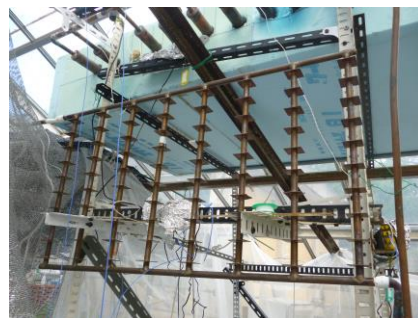
(a) 全体の概略図



(b) 蒸発器と氷蓄熱部



(c) 太陽熱集熱器 (冷媒の吸着と脱着)



(d) 凝縮器

図4 太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システム

## (2) 水供給による気化冷却に関する結果

図5は、水供給のオンオフに対して庫内温度が時間的にどのように変化するか、その動的な挙動を見たものである。上から、庫内温度、相対湿度、そして水供給の on-off 操作である。水供給をオンすると、温度は30分ほどで1℃ほど低下するが、その動特性は1もしくは2次遅れ程度であり、応答速度は結構早いと分かる。一方、水供給をオフした場合は逆の応答である。相対湿度は、水供給をオンすると5%RHほど上昇したが、オフすると6%RHほど上昇した。このように、庫内温度は水供給の on-off 操作に対応して上下することから制御可能と分かる。

このような入出力データを25パターン取得し、これらの入出力関係(動的データ)を、3層のニューラルネットワークを用いて学習し、動的モデルを構築した。このとき、22パターンは学習用によるモデル化に、3パターンはそのモデルの検証用に用いた。その結果、最適な次数と中間層ニューロン数を検証処理で試行錯誤的に選ぶことにより、精度の良い動的モデルを構築することができた。

次に、構築したニューラルネットワークモデルを用いて、そのシミュレーションから、遺伝的アルゴリズムを用いて、庫内の温度を最低にする8ステップの水供給の最適な on-off 操作パターンを求めた。さらに、それに基づいて最適制御を試みた。

図6は、庫内の温度を最低にするための8ステップの水供給操作(on-off操作)の最適制御結果である。遺伝的アルゴリズムにより得られた最適値は $\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}\} = \{35 \text{分 ON}, 55 \text{分 OFF}, 35 \text{分 ON}, 55 \text{分 OFF}, 35 \text{分 ON}, 55 \text{分 OFF}, 35 \text{分 ON}, 55 \text{分 OFF}, 35 \text{分 ON}, 55 \text{分 OFF}, 35 \text{分 ON}, 55 \text{分 OFF}, 35 \text{分 ON}, 55 \text{分 OFF}\}$ となった。これを実際に適用したのがこの最適制御結果であった。

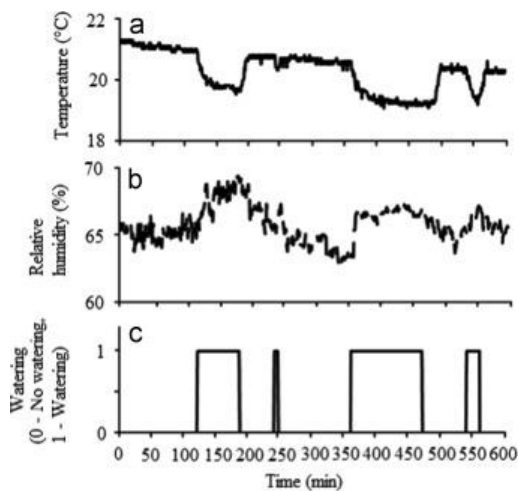


図5 水供給(on-off操作)に対する庫内の温度と相対湿度の動的変化

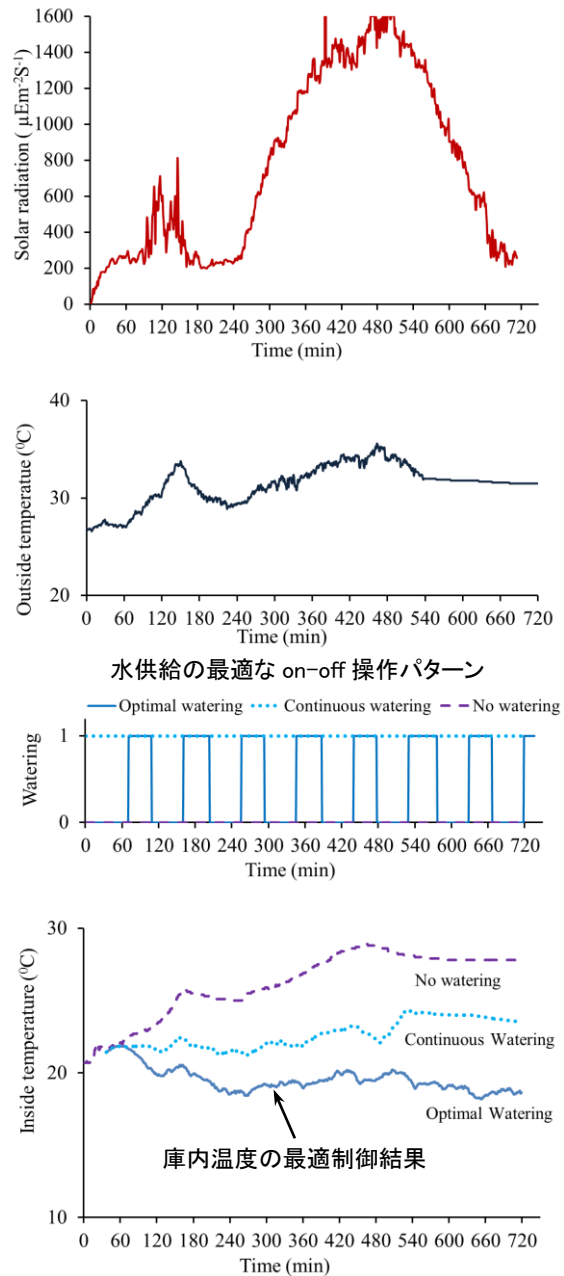


図6 庫内の温度を最低にする水供給(on-off操作)の最適制御結果

図6より、庫内温度の最高値は、水供給無しでは約29℃まで上昇したが、連続水供給では約25℃、最適な水供給では約20℃で止まっているのが分かる。平均温度で見ると、最適な水供給、連続水供給、水供給無しの順に18.7、22.6、26.2℃であった。このように、最適な水供給制御では、水供給無しの場合よりも7.5℃低く、この理由は水が有る無しの違いなので明らかであるが、連続水供給の場合と比べても3.9℃低いのが分かる。この理由は、充填材の粒子の水の濡れる度合い(蒸発面積)の違いであり、連続水供給では水分過多で減少するが、最適な水供給制御では最大となり、蒸発に適した液相と気相のバランスを与えたためだと考えられる。



(a) 庫内に置いたトマト



(b) 庫外に置いたトマト

図7 16日間貯蔵した後のトマトの様子

図7はこの手法により貯蔵した16日後のトマトの状態である。庫外に置いたトマトは水分減少率が小さく、約16日目で腐敗したが、庫外に置いたトマトは約7日目で腐敗した。

### (3) 太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システム

次に、太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システムに関する実験結果を示す。図8と9は基礎的な実験結果であり、実物とは異なる小型の吸着式冷却システムで行った。図8は活性炭量と温度低下の関係である。活性炭量を多くするほど温度は直線的に低下した。これは活性炭の量が増えると吸着されるメタノール量が増え温度がより低下したためと考えられる。図9は冷媒として3種のアルコールを用いた場合の温度の経時変化を表したものである。この結果は各冷媒の揮発性の違いによるものであり、アセトンとメタノールが気化冷却に有利であり、特にアセトンは温度を急低下させることができ、30分ほどで $-12.5^{\circ}\text{C}$ までかなり低くなった。しかしアセトンは揮発性が高いのでなくなりやすく、また燃えやすいので使いにくいと言える。

ここでの実験結果より、蒸発器の冷却能力は、真空状態で、吸着剤(活性炭等)の性能と量によって、かなり変わると分かった。また、アルコール冷媒としては安全性を考慮して、メタノールを用いた。

次に、実物を用いた結果を示す。図10は太陽熱集熱器(脱着温度)と蒸発器の温度の日変化である。本冷却システムにおいて、夜間はメタノールを活発に蒸発させて気化冷却により氷をつくるが、昼間は太陽熱で活性炭からメタノールを脱着させ、その後凝縮器で冷やして液体に戻すと同時に、蒸発器内の氷水を循環させて庫内を冷やす。太陽熱集熱器の温度は、昼間は日射量の増大とともに上昇し $100^{\circ}\text{C}$ 以上となるが、蒸発器内の水温は $5^{\circ}\text{C}$ ほどの増加にとどまっている。また、夜間においては8時ごろからメタノールを活発に蒸発させて気化冷却を促進させるが、これにより蒸発器内の水温は $-10^{\circ}\text{C}$ まで低下し、 $3.5\text{kg/day}$ の氷ができた。

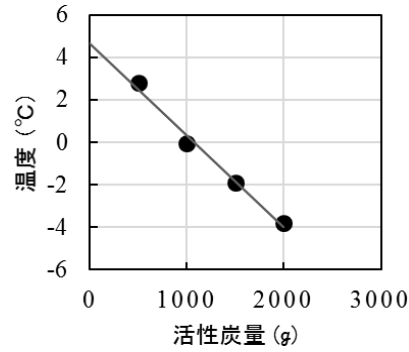


図8 活性炭量と温度低下の関係

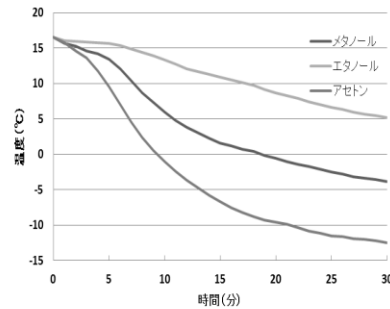


図9 3種のアルコール冷媒を用いた場合の温度の経時変化

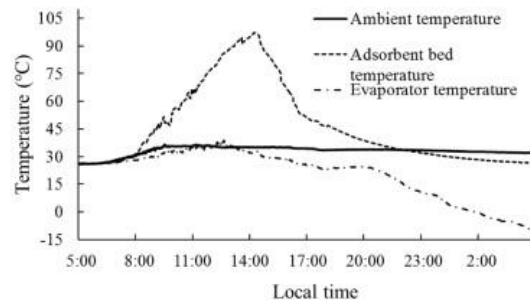
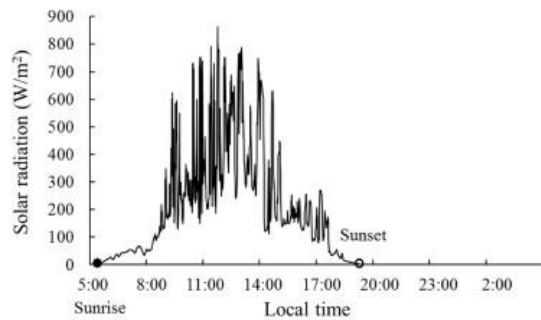


図10 太陽熱集熱器と蒸発器の温度の日変化

図11は、水供給(連続給水)による気化冷却と太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システムの稼働による庫内環境の日変化である(短時間応答)。上から、温度(周囲温度、庫内温度)、庫内の相対湿度、水供給の on-off 操作(連続給水)と太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システムでつくられた氷水の循環操作である。1日目は、連続給水のみによる気化冷却であり、こ

れにより庫内温度は、周囲温度が約 37°C まで上昇したのに対し、約 22°C に保持された。相対湿度は 74~77%RH である。2 日目は、連続給水に加え、2 時から夜 8 時まで氷水の循環によって庫内の冷却を行った場合である。これにより、周囲温度は約 35°C まで上昇しているが、庫内温度は最低で約 10°C まで低下した。また、これに伴い、庫内の相対湿度は約 90%RH まで上昇した。このような高湿度は、カビ等の発生につながるのでは好ましいとは言えないが、青果物の蒸発散に伴う水分損失の低減からすれば、非常に有効と考えられる。このように、太陽熱吸着式冷却システムを稼働させることで、庫内温度は、連続給水のみの場合と比べ、約 12°C 低下させることができた。

以上より、本研究で試作したゼロエネルギー低温貯蔵庫は、電気をほとんど使用しないので、省エネタイプの貯蔵庫として役立つと考えられる。また、電気の利用が困難な場所（畑など）、もしくは開発途上国での簡易な貯蔵庫として役立つと思われる。

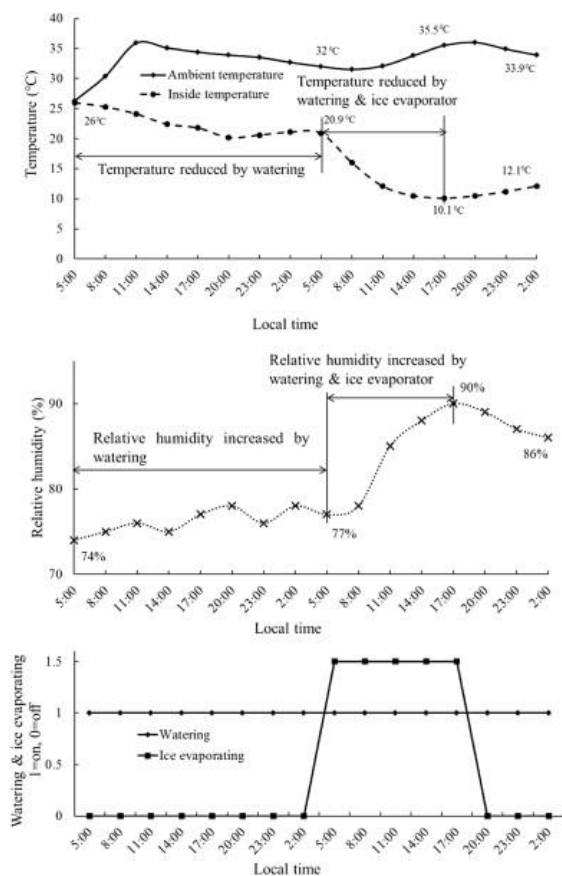


図 1 1 水供給による気化冷却と太陽熱吸着式氷蓄熱冷却システムの稼働による庫内の温度と相対湿度の日変化（短時間応答）

## 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 9 件）

(1) Islam, M.P. and Morimoto, T. Nonlinear

autoregressive neural network approach for inside air temperature prediction of a pillar cooler. *International Journal of Green Energy*, 14(2), 141-149, 2017. 査読有

- (2) Islam, M.P. and Morimoto, T. Thermodynamic performances of a solar driven adsorption system. *Solar Energy*, 139, 266-277, 2016. 査読有
- (3) Islam, M.P. and Morimoto, T. Quality of fresh tomato fruit stored inside a solar adsorption cooling storage system as function of low pressure treatment. *CIGR Journal*, 18(3), 258-265, 2016. 査読有
- (4) Islam, M.P. and Morimoto, T. Performance of mathematical system identification in modeling of hybrid evaporative cooling system. *International Journal of Computer Applications*, 123(1), 44-49, 2015. 査読有
- (5) Islam, M.P. and Morimoto, T. Evaluation of a new heat transfer and evaporative design for a zero energy storage structure. *Solar Energy*, 118, 469-484, 2015. 査読有
- (6) Islam, M.P. and Morimoto, T. Progress and development in brick wall cooler storage system. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 50, 277-303, 2015. 査読有
- (7) Islam, M.P. and Morimoto, T. Performance prediction of solar collector adsorber tube temperature using a nonlinear autoregressive model with exogenous input. *International Journal of Computer Applications*, 114(12), 24-32, 2015. 査読有
- (8) Islam, M.P. and Morimoto, T. A new zero energy cool chamber with a solar-driven adsorption refrigerator. *Renewable Energy*, 72, 367-376, 2014. 査読有
- (9) Islam, M.P., Morimoto, T., Hatou, K. Effect of passive evaporative cooler on physico-chemical properties of hot water treated *Solanum melongena* L. *CIGR Journal*, 16(2), 181-186, 2014. 査読有

〔学会発表〕（計 5 件）

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
森本 哲夫 (MORIMOTO, Tetsuo)  
愛媛大学・大学院農学研究科・教授  
研究者番号：5 0 1 2 7 9 1 6