

促成ピーマンにおける高効率ヒートポンプの省エネルギー性能 及び加温特性の解明と栽培の実証

小林 理・大山克己*・吉田俊郎

キーワード：ピーマン，ヒートポンプ，施設園芸，暖房，促成作型

I 緒 言

千葉県の九十九里沿岸にある匝瑳地域は県内最大のピーマン産地であり，ピーマン（未成熟果）と赤ピーマン（完熟果）を周年出荷している．かつては古タイヤやA重油を燃料とした温湯ボイラーの暖房による促成栽培が主流であった．その後，環境負荷の低減や暖房効率の向上を目的にA重油を燃料とした温風暖房機の使用が主流となった．現在はA重油価格の上昇に伴い，加温をほとんど必要としない半促成栽培を主体に抑制と促成を組み合わせた栽培体系で周年出荷を維持している．

一方，園芸施設用ヒートポンプは1979年の第二次オイルショックを契機に研究と実用化が推進され，主に水熱源方式のヒートポンプが普及した（古在，1983）．その後，原油価格が低下し，独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構の調べによると1990年代まではおおむね1バレルあたり20ドル程度で推移したことから，石油燃焼式温風暖房機が園芸施設における暖房の主体となった．2008年には原油価格が再び上昇し，A重油や灯油の価格が高騰した．さらにヒートポンプそのものの省エネルギー性能が向上したことから，石油燃焼式の暖房機のみには依存しない暖房として農事用のヒートポンプは再び注目を浴び，2010年には300haで利用されていると推測されている（林，2010）．ヒートポンプのエネルギー効率は定格暖房能力を定格暖房消費電力で除した暖房時成績係数（Coefficient of performance for heating, 以下COPとする）で示され，値が高いほどエネルギー効率がよく，さらに暖房の設定温度が高いほど暖房経費を削減する効果が高い（大山・古在，2009）．

このため，暖房の設定温度が18℃程度（高橋，1999）と高いピーマン栽培ではヒートポンプの導入メリットが期待できると考えられる．これまでにピーマン栽培においてヒートポンプと温湯暖房機の併用運転により冬期の暖房コストが削減できるとことが明らかにされている（山本・工藤，

2010）が，ヒートポンプの実効率やエネルギー消費量の削減効果を正確に実証した報告はなく，ピーマンの生育及び収量に対する影響を報告したのも見当たらない．

そこで，本試験は農事用ヒートポンプの中でCOPが4.9と高効率である機種を供試し，促成作型でピーマンを栽培して，灯油燃焼式温風暖房機と比較し，ヒートポンプの加温特性，エネルギー実効率，ピーマンの生育及び収量を明らかにしたので報告する．

試験の実施にあたり，機材の提供を頂いた株式会社東電ホームサービス並びに株式会社イズに心より御礼申し上げます．

II 材料及び方法

1. 試験場所及び試験区の構成

試験は千葉県匝瑳市にある北総園芸研究所砂地野菜研究室（現東総野菜研究室砂地試験地）のPOフィルムを展張した2連棟の鉄骨ハウス（1棟126m²）で実施した．1棟ずつ単独のハウスを模擬するために，それぞれの棟の間を0.05mm厚の農ビカーテンで間仕切りをし，ヒートポンプ区及び石油暖房区とした．

ヒートポンプ区には，農業用ヒートポンプ（アグリmoぐっぴー：SPW-AGCHVP180E，三洋電機製）を対角線上に2台配置して暖房に使用した．この機種は空気熱源式のヒートポンプであり，インバーター機能を搭載している．JIS B8616に基づいた定格暖房能力は1台あたり18.0kW，定格暖房消費電力は3.67kWである．

また，供試機種は暖房の有無にかかわらず運転時に常時送風状態となるので，この影響を軽減するため，試験の際には外付けサーモコントローラー（ニューセンサーⅡ，ニッポー電気製）を用いて，機器の発停を管理した．

石油暖房区には，灯油燃焼式温風暖房機（小型温風機KA1型：KA-321，ネボン製）を1台配置した．この機種の暖房能力は37.2kWで使用燃料はJIS1号灯油である．試験の際，本体内蔵のサーモコントローラーで燃焼を管理した．

なお，内張カーテンには両区とも0.05mm厚の農ビを用いた．

受理日2011年8月22日

*千葉大学健康環境フィールド科学センター

2. 栽培概要

栽培には慣行品種である「京鈴」(タキイ種苗)を用いた。2009年8月17日に播種し、8月27日に12cm径の黒色ポリポットに鉢上げして育苗した。10月2日にベッド幅90cm, 通路幅75cm, 株間60cm, 栽植密度1,010株/10aで定植した。

基肥として10a当たり, もみ殻牛ふん堆肥 2,000kg, 苦土石灰 50kg, エコロンG424 180日タイプ (N:P₂O₅:K₂O=14-12-14) 100kg, CDUタマゴ化成S555 (同15-15-15) 50kg 及び苦土重焼燐 (同0-35-0) 50kg, けい酸加里 (同0-0-20) 50kgを施用した (合計成分量N:P₂O₅:K₂O=21.5:37.0:31.5kg)。追肥として10a当たり, ロングショウカル (N:P₂O₅:K₂O=12-0-0) 50kg及び燐硝安加里S604 (同16-10-14) 160kgを施用した (合計成分量N:P₂O₅:K₂O=31.6:16.0:22.4kg)。基肥と追肥の合計成分量は, N:P₂O₅:K₂O=53.1:53.0:53.9kg/10aである。

主枝の仕立て法は4本仕立てとし, 果実の収穫は収穫期前半は未成熟果を, 後半は完熟果を収穫する方法で実施した。11月2日から翌2010年2月4日までは未成熟果を, 3月8日から8月2日までは完熟果をそれぞれ収穫した。

3. 暖房設定温度

暖房は2009年11月2日から翌2010年5月18日まで実施した。暖房時の設定気温はヒートポンプ区, 石油暖房区ともに18℃とした。

4. 調査

(1)電力消費量

両試験区の暖房に要した電力消費量はクランプオンパワーハイテスタ (3168, 日置電機製) を用いて測定した。なお, ヒートポンプ区では, ヒートポンプ本体を構成する室外のコンプレッサー, 室外機の熱交換ファン, 室内の送風ファン, その他の制御機器などにより電気は消費される。一方, 石油暖房区では, 送風ファン, 燃料輸送ポンプ, その他の制御機器により電気は消費される。

(2)燃油消費量

石油暖房区の暖房に消費した燃油消費量は暖房開始時に燃料タンクを満杯にし, 給油時にタンクが満杯になるまで追加補給する方法で計測した。補給量は重量で測定し, 比重を0.80とし容量換算した。

(3)暖房に要するエネルギー消費量及び暖房によるCO₂排出量

暖房に要するエネルギー消費量は, 『エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則 (昭和五十四年九月二十九日通商産業省令第七十四号, 最終改正平成二二年三月一九日経済産業省令第一号)』により算定した。暖房によるCO₂排出量は, 環境省の策定した『事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン (試案 Ver. 1.6)』(2005年)により算出した。なお, 大山・古在 (2008b) に詳細

な方法が記載されている。

(4)生育調査

生育調査は定植から約1か月後の11月4日と, 主枝摘心前の12月7日に行った。調査項目は主幹長, 第1次分枝直下の主幹径, 主枝長, 主枝節数とした。調査は両区とも84株全てを対象とした。

(5)収量調査

果実は両区の全ての株から約7日間隔で収穫し収量調査を行った。未成熟果は慣行の出荷基準に従い, 可販品と販売不可品に分類し, 可販品は重量を2g単位に測定し, 重量別にL (38g以上), M (26~36g), S (20~24g) に分類して収量を調査した。完熟果においても慣行の出荷基準に従い, 可販品, 着色不良, 変形及び軟化果実であるB品, 販売不可品に分類し, 可販品は重量別に2L (80g以上), L (50~78g), M (30~48g), B品はBL (50g以上), BM (26~48g) に分類して収量を調査した。

Ⅲ 結 果

1. 加温特性

(1)暖房期間におけるハウス内外の温湿度の推移

冬期の16時から翌朝8時までの時間帯について, 外気とハウス内の温湿度の旬別の平均値を第1表に示した。ヒートポンプ区の気温は, 同時期の石油暖房区の気温と比較し, -0.4~+0.1℃とやや低く推移した。湿度は石油暖房区に比べて-7~+1%と総じて低く推移した。

(2)厳寒期におけるハウス内気温

深夜から早朝にかけて氷点下まで外気温が低下した2月7日16時30分から翌8時30分までの外気及びハウス内の気温変化を第1図に示した。ヒートポンプ区の気温の変動幅は4.8℃であったのに対し, 石油暖房区のそれは4.4℃であり, ヒートポンプ区の方がやや大きかった。

2. 暖房に要するエネルギー量及びCO₂排出量

2009年11月7日から2010年5月18日までの暖房期間に消費した電力量を第2表に, エネルギー消費量及びCO₂排出量を第3表に示した。ヒートポンプ区の電力消費量は6,636kWhであった。石油暖房区の燃料消費量は2,885L, 電力消費量は381.2kWhであった。ヒートポンプ区及び石油暖房区における暖房に要するエネルギー消費量は, それぞれ63.2GJ及び109.5GJであった。また, 暖房によるCO₂排出量は, それぞれ2,508kg及び7,299kgであった。

3. ピーマンの生育及び収量に及ぼす影響

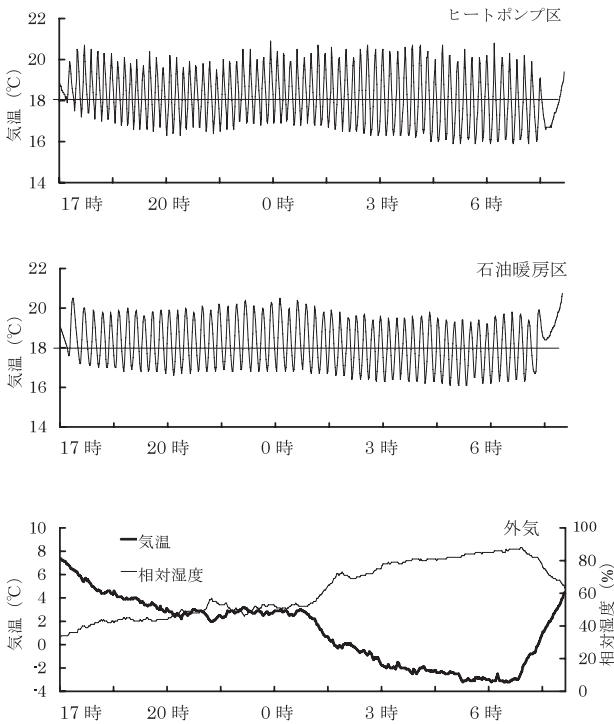
(1)ピーマンの生育に及ぼす影響

暖房開始時の生育を第4表に示した。生育の進行度合いを示す主枝節数はヒートポンプ区で7.0節, 石油暖房区で6.9節であり, ほぼ同等であった。暖房開始から約1か月

第1表 冬季の暖房時におけるハウス内外の温湿度の推移

| 年月旬 | 外気 | | ヒートポンプ区 | | 石油暖房区 | | |
|------------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|----|
| | 気温(°C) | 相対湿度(%) | 気温(°C) | 相対湿度(%) | 気温(°C) | 相対湿度(%) | |
| 2009年11月上旬 | 11.2 | 97 | 19.3 | 84 | 19.3 | 86 | |
| | 中旬 | 11.4 | 92 | 19.0 | 83 | 18.9 | 85 |
| | 下旬 | 9.0 | 93 | 18.4 | 82 | 18.7 | 81 |
| 12月上旬 | 8.0 | 92 | 17.7 | 80 | 18.0 | 80 | |
| | 中旬 | 5.3 | 87 | 17.3 | 72 | 17.7 | 75 |
| | 下旬 | 3.8 | 85 | 17.2 | 65 | 17.6 | 68 |
| 2010年1月上旬 | 1.7 | 73 | 17.0 | 58 | 17.2 | 64 | |
| | 中旬 | 0.8 | 81 | 16.8 | 59 | 17.2 | 65 |
| | 下旬 | 4.9 | 78 | 17.4 | 67 | 17.6 | 72 |
| 2月上旬 | 3.0 | 84 | 17.2 | 67 | 17.5 | 75 | |
| | 中旬 | 3.1 | 90 | 17.1 | 70 | 17.5 | 77 |
| | 下旬 | 6.7 | 91 | 18.0 | 81 | 18.0 | 86 |

注1) ハウス内は暖房機制御用サーモセンサーの設置場所に温湿度計を設置し、30分間隔で測定した
 2) 外気はハウス横、高さ1mの位置に温湿度計を設置し、2分間隔で測定した
 3) 16時～翌8時の旬ごとの平均値で示した



第1図 厳寒期におけるハウス内外温湿度の推移

注) 2010年2月7日～翌8日の測定値

第2表 暖房に消費した電力量

| 年月 | 電力量 (kWh) | | | |
|----------|-----------|-------|-------|-----|
| | ヒートポンプ区 | | 石油暖房区 | |
| | 月別 | 累積 | 月別 | 累積 |
| 2009年11月 | 620 | 620 | 46 | 46 |
| 12月 | 1,248 | 1,868 | 73 | 118 |
| 2010年1月 | 1,694 | 3,562 | 86 | 204 |
| 2月 | 1,369 | 4,931 | 68 | 272 |
| 3月 | 1,000 | 5,930 | 59 | 331 |
| 4月 | 622 | 6,552 | 43 | 374 |
| 5月 | 84 | 6,636 | 7 | 381 |

第3表 暖房に消費したエネルギー量の比較

| | ヒートポンプ区 | 石油暖房区 |
|---------------------|------------|-----------|
| 電力消費量 | 6635.9 kWh | 381.2 kWh |
| 燃油(灯油)使用量 | - | 2885.1 L |
| 純エネルギー消費量 | 23.9 GJ | 108.7 GJ |
| エネルギー消費量 | 63.2 GJ | 109.5 GJ |
| CO ₂ 排出量 | 2508.4 kg | 7299.1 kg |

注1) 2009年11月2日から2010年5月18日までの実測値である

2) 『事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン(試算Ver.1.6)』(環境省, 2005年)に従い算出した。

従量単位あたりの純エネルギー量:

電気 3.60MJ×消費量(kWh), 灯油 36.7MJ×消費量(L)

CO₂排出量:

電気 0.378kg×消費量(kWh)

灯油 2.49kg×消費量(L)

3) 『エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則

(昭和五十四年九月二十九日通産省令第七十四号, 最終改定平成二二年三月一九日経済産業省令第一号)』に従い算出した。

従量単位あたりのエネルギー消費量

昼間(8～22時): 9.97MJ×消費量(kWh)

夜間(22～翌8時): 9.28MJ×消費量(kWh)

第4表 暖房開始時の生育状況

| 試験区 | 主幹長(cm) | 主幹径(mm) | 主枝長(cm) | 主枝節数(節) |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| ヒートポンプ区 | 22.9 | 10.0 | 44.6 | 7.0 |
| 石油暖房区 | 23.7 | 9.7 | 43.6 | 6.9 |

注) 2009年11月4日調査

第5表 主枝摘心時の生育状況

| 試験区 | 主幹長(cm) | 主幹径(mm) | 主枝長(cm) | 主枝節数(節) |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| ヒートポンプ区 | 22.2 | 13.0 | 67.4 | 11.5 |
| 石油暖房区 | 21.9 | 12.6 | 60.9 | 11.2 |

注) 2009年12月9日調査

後の生育を第5表に示した。主枝節数はヒートポンプ区で11.5節、石油暖房区で11.2節であり、ほぼ同等であった。

(2) ピーマンの収量に及ぼす影響

未成熟果の収量を第2図に、完熟果の収量を第3図に示した。未成熟果の10a当たり収量の可販収量はヒートポンプ区で2.2t、石油暖房区で1.8tであった。また、完熟果の可販収量は、ヒートポンプ区で7.4t、石油暖房区で7.0tであった。いずれもヒートポンプ区の収量がやや多かった。

IV 考 察

高効率ヒートポンプ「アグリmoぐっぴー」の利用によって、暖房に要するエネルギー消費量を約40%、暖房によるCO₂排出量を約66%、それぞれ削減できることが、本試験により実証された。ピーマンの促成栽培においては、冬季の暖房コストの上昇が利益の低下に直結してしまう。それゆえ、ヒートポンプの利用による暖房コストの低減は、生産者にとって望まれる技術であると考えられる。また、CO₂排出量の削減は、農業分野での排出は少ないものの、社会全体でその削減が求められている(大山・古在, 2008a)。

ヒートポンプ区と石油暖房区の定植1か月までの生育は同等であり、両区ともほぼ均一な条件で試験が開始された。しかし、ピーマンの生育および収量は、ヒートポンプ区において石油暖房区よりも大きくなる傾向が見られた。暖房

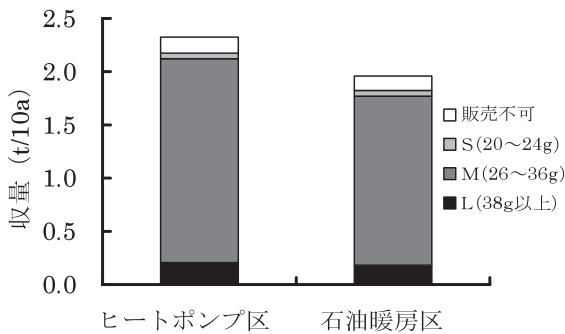
の種類にかかわらずほぼ同じ環境条件を与えた場合、ピーマンの生育および収量には差が生じないと予想していたが、得られた結果はそれとは異なっていた。したがって、考慮しなかった環境(たとえば、気流など)が生育及び収量に影響を及ぼした可能性がある。今後、ピーマンの促成栽培だけでなく他の品目におけるヒートポンプの利用を進める上で、ヒートポンプと石油暖房器による加温の際の環境の差異を詳細に調査する必要がある。

暖房方法が全く異なるヒートポンプ区と石油暖房区を熱環境的に単純比較することは困難である(Tong et al. 2010)ものの、石油暖房区の純エネルギー消費量をヒートポンプ区の純エネルギー消費量で除して求めた概算のCOPは4.55であり、JIS B8616で定められた標準条件下(室内:20℃(乾球), 15℃以下(湿球)・室外:7℃(乾球), 6℃(湿球))で測定された供試機種種のCOPとほぼ同じであり、供試機種種は実効率も高いことが実証された。

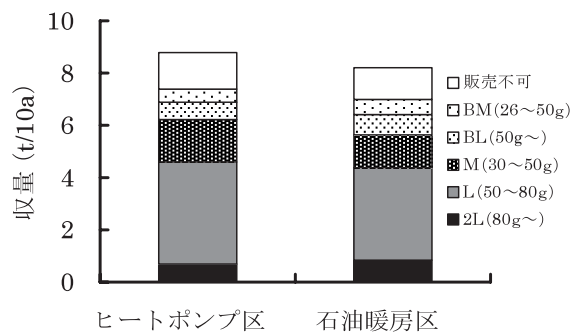
本試験ではヒートポンプを石油燃焼式温風暖房機用に開発されたコントローラーで制御したため、石油暖房区に比べ、設定値に対してハウス内気温が大きく低下する現象が生じた。特に外気温が低かった2月中旬に顕著に認められたことから、ヒートポンプはコンプレッサーの起動に時間を要するため、石油燃焼式暖房に比べ室内機から温風が開始するまでに時間がかかることに起因していると考えられる。供試機種種はインバーター制御でモーターを動作させており、制御方法の最適化を図ることで温度の変動を抑制することが可能と考えられる。また、最適化により実際のCOPをさらに向上できる可能性もある。

本試験では、ヒートポンプ区の変動幅は、石油暖房区よりも大きく、2月中旬には暖房時間帯の平均気温が16.8℃という結果であったものの、生育及び収量には影響を及ぼさなかった。したがって、平均気温が確保されていれば、気温の変動はピーマン生産の上で問題とはならない可能性が高い。他方で、気温の変動が生育及び収量に及ぼす可能性もあることから、今後のデータの蓄積が望まれる。

近年、冷暖房用途に利用されるヒートポンプの性能は著しく向上した。特に、家庭用として市販されている高性能小型ヒートポンプのCOPは最高の製品で7.2に達している(財団法人省エネルギーセンター, 2011)。これまでに、高性能小型ヒートポンプの農業利用を目的として、暖房費及びCO₂排出削減効果を試算した例がある(大山・古在, 2008b)。また、ハウスや温室の暖房への利用のための実証試験も行われている(Tong et al. 2010)一方、生産現場へのヒートポンプの普及も進みつつある。本研究ではピーマンを対象として実験を行ったが、今後は、対象品目の拡大や有効な活用法を研究し、生産者に有益な品目や導入法を明らかにする必要がある。



第2図 未成熟果の収量



第3図 完熟果の収量

注) BM, BLは着色不良, 変形, 軟化果実を示す

また、ヒートポンプは外気温の影響を受けやすいことや、暖房の全てをヒートポンプでまかなうことは高額な導入コストになることから、既存の石油燃焼式暖房機との併用するハイブリッド方式が標準的な導入法となっており実証も行われている（本美,2009）。導入コストがかかることや、電気料金の今後の見通しの不安定さなどの不安要素はあるものの、ヒートポンプ性能は確実に向上しており、それに応えるために園芸施設における利用技術の開発を今後も継続していくことが望まれる。

V 摘 要

農事用高効率ヒートポンプを供試して促成作型でピーマンを栽培した。石油燃焼式温風暖房機と比較したところ、ヒートポンプ区は石油暖房区に比べ、気温の変動幅が大きくなるなどの現象が認められたもののピーマンの生育及び収量はほぼ同等であった。また、石油暖房区に比べて暖房に要するエネルギー消費量を約40%削減でき、CO₂排出量は、石油暖房区のそれよりも約66%小さくなった。

VI 引用文献

大山克己・古在豊樹（2008a）園芸用施設の暖房費およびCO₂排出削減[1]。農業および園芸。83:1157-1163。
大山克己・古在豊樹（2008b）園芸用施設の暖房費および

CO₂排出削減[2]。農業および園芸。83:1257-1264。
大山克己・古在豊樹（2009）電気ヒートポンプの利用による園芸用施設の暖房費およびCO₂排出量の削減。農業電化。62（3）:2-7。
古在豊樹（1983）施設園芸におけるヒートポンプ利用技術の現状と問題点。施設と園芸。43:28-32。
財団法人省エネルギーセンター（2011）省エネ型製品情報サイト。http://www.seihinjyoho.jp/
高橋英生（1999）生育ステージと温度管理。農業技術体系野菜編5 追録2「基礎編」（農山漁村文化協会 編）pp.163-165。農山漁村文化協会。
Tong, Y., T. Kozai, N. Nishioka and K. Ohyama（2011）Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP). *Biosystems Engineering*. 106:405-411。
日本規格協会（2006）パッケージエアコンディショナJIS B8616。
林真紀夫（2010）農業経営を活性化するヒートポンプ。農業電化。63(4):2-4。
本美善央（2009）ハウスミカン栽培におけるハイブリッド暖房方式による暖房コストの削減効果。農業電化。62（4）:19-22。
山本敬司・工藤りか（2010）ピーマンの施設栽培におけるヒートポンプ利用の効果。農業電化。63（7）:42-46。

Highly Efficient Heat Pump Installation in Greenhouse for Sweet Pepper Cultivation

Osamu KOBAYASHI, Katsumi OHYAMA and Syunro YOSHIDA

Key words : sweet pepper, heat pump, greenhouse cultivation, heater, forcing culture

Summary

Sweet pepper plants of the forced cropping type were grown in a greenhouse equipped with a highly efficient heat pump. Although larger fluctuations in air temperature were observed than with the use of an oil heater, the growth and yield of sweet pepper in the greenhouse equipped with the heat pump were comparable. Energy consumption in the greenhouse equipped with the heat pump decreased by 40% , and CO₂ emission- decreased by 66%, compared with those in a greenhouse equipped with an oil heater.