

ヒートポンプと重油式暖房機による温室冷暖房用ハイブリッド
システムの開発とバラ栽培への応用*

Development of Hybrid Greenhouse Heating and Cooling System by
an Air-to-air Heat Pump and its Application to Rose Production

佐藤 展之
SATO NOBUYUKI

*本論文は明治大学大学院農学研究科審査論文 2015 年（平成 27 年）を基に編集，加筆したものである．

目 次

第Ⅰ章 緒 言	1
第Ⅱ章 温室冷暖房用ハイブリッドシステムの概要	4
第Ⅲ章 温室冷暖房用ハイブリッドシステムの暖房費削減効果	7
第Ⅳ章 ハイブリッドシステムのバラ栽培への応用（バラの収量品質）	14
第Ⅴ章 ハイブリッドシステムのバラ栽培への応用（水分動態）	23
第Ⅵ章 ハイブリッドシステムへの太陽光発電による再生可能エネルギーの利用	31
第Ⅶ章 総合考察	40
摘 要	46
Summary	47
謝 辞	49
引用文献	50

第I章 緒言

2012年度の日本における野菜の産出額は2兆1896億円、花きの産出額は3451億円、果樹の産出額は7471億円で、園芸作物の合計は3兆2818億円と、農業総産出額8兆5251億円の38%を占め、農業生産において重要な作物である(農林水産省 生産農業所得統計, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001117298>, 2014年7月16日参照)。

園芸作物には、ガラス温室(以下温室という)やプラスチックハウス(以下ハウスという)などで栽培される施設園芸作物が多い。施設栽培は露地栽培と異なり、気温や湿度などの環境調節も可能で養液栽培もでき、露地栽培よりもはるかに効率よく、しかも高品質な作物を安定的に栽培できる(池田, 2008)。施設園芸では、技術導入により生産性を向上すると同時に、生産に関わる費用を削減することために、初期投資、ランニングコスト、輸送販売コストなど多くのコストを可能な限り抑制することが、重要である。

山田(2008)は、2006年における宮城県のトマト大規模施設園芸の経営課題を調査し、1998年に設立した1haのフェンロー型温室の設置事業費は4億2200万円で、65%の補助金を利用したため年間の減価償却費は703万円、経営費合計は8392万円、粗収益は9426万円で所得は1000万円であった。また、肥料・農薬・種苗費は経営費の約6%であるが、水道光熱費は経営費の約29%となり、その約70%である1700万円を、暖房費が占めていた。2006年におけるA重油価格は59円/L¹である(図1-1)。2013年のA重油平均価格を91円/L¹と仮定すると、暖房費は約2600万円となり、これは経営費の28%を占めることから、利益も100万円に低下してしまう。このように、施設園芸における暖房費の占める割合は、経営コストの中でも非常に大きい。

2009年の日本における園芸作物(野菜、花き、果樹)のガラス室及びハウスの面積は62182haで、そのうちの約35%の21581haは加温設備を有している(農林水産省 園芸用施設及び農業用プラスチックに関する調査, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001074417>, 2014年7月11日参照)。また、施設園芸における加温設備の95%は石油を利用した暖房装置を用いており、施設園芸は有限な資源である石油に大きく依存している。

石油価格は変動が大きく、2002年では35円/L¹程度であったA重油価格は、2008年8月には121円/L¹にまで上昇し(経済産業省資源エネルギー庁、石油製品価格調査, http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html#headline3, 2015年1月27日参照、図1-1)、施設園芸の経営を大きく圧迫した。重油価格は変動しているが、

有限資源であり将来的にも上昇傾向は続くと推測される。このような情勢の中で、石油資源に依存しない施設園芸の確立を図ることは、施設園芸の将来にわたる持続性を維持するためにも非常に重要な課題である。

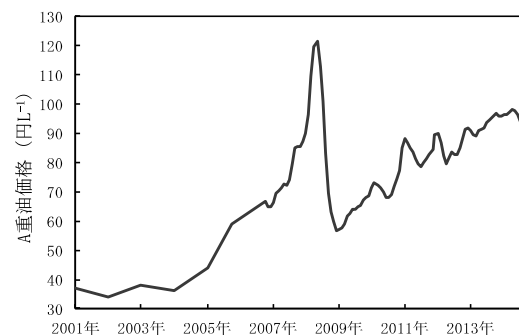


図1-1 A重油価格の推移

*経済産業省資源エネルギー庁小型ローリー納入価格全国平均値。

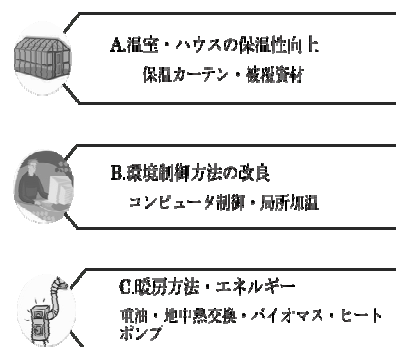


図1-2 施設園芸における温室・ハウスの冷暖房技術

図1-2に我が国で培われてきた、冬の温室内温度を維持管理するための技術を図示化した。施設園芸における脱石油化を推進するための省エネルギー対策において、暖房燃料使用量の削減に最も有効なのは、保温性能を高めることである(林, 2009, 川嶋, 2014)。温室の出入口や、保温カーテンの隙間を極力少なくする事は、比較的経費がかからない省エネルギー対策であり、保温カーテンの設置や、2層カーテンなどの多層被覆は、もっとも一般的に行われている省エネルギー対策である(林, 2009)(図1-2A)。

岡田(1980)は、温室において一般的に広く普及している、ポリエチレンフィルム1層カーテンの場合の熱節減率は0.30、ポリエチレンフィルム2層カーテンの場合の熱節減率は0.45と、多層になれば熱節減率は高くなることを明らかにした。しかしながら、温室内の資材が増加するため光線透過率は低下し、換気率も低下するため温室内は多湿環境になる。カーテンの多層化による熱節減率の向上と、温室の光線透過率の低

下, および温室内の湿度上昇は相反する要素である。そのため, 保温カーテンでの省エネルギー対策には限界がある。これらの欠点を克服するため, 岡田ら(1983)は, 2枚の固定被覆資材の間にブロワーで送風し, 空気層を作り出す空気膜二重構造ハウスについて検討し, 保温カーテンと比較して駆動装置やワイヤーなどの資材が少ないため, 保温性が高く光の透過性も高いことを報告した。岩崎ら(2011)は, キュウリ栽培において, 保温性に優れる空気膜二重構造ハウスとすることで, 慣行よりも26% 暖房用燃料消費量を削減できることを明らかにした。この技術はきわめて重要な保温技術であるが, 暖房方法としては別の技術と組み合わせなければならない。

川嶋(2014)は, ハウスにおける保温性能を更に向上させるために, 塩化ビニール製保温カーテンよりも著しく断熱性の高い, 多層保温資材(布団資材)を利用することで, 暖房負荷係数は慣行ハウスの $2.39 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ から $1.43 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ に低下し, 暖房費を40% 削減できることとなり, 布団資材と水蓄熱を併用することで, 暖房負荷係数を $0.91 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ まで低下できると報告している。布団資材は, 韓国のハウスでは内張りの保温カーテンや外部被覆材として使われているが, 日本で使用されている例はない(丸尾, 2009)。しかしながら, このように保温性能が高い布団資材と水蓄熱を組み合わせたハウスの実測値データでも, 外気温が 0°C の時にハウス内は 9.4°C であり, 栽培作物によっては暖房機が必要となる。

以上のように保温資材や園芸施設の改良により, 図1-2Aのように, 資材からの取り組みは盛んに行われている。これらとは別に暖房費そのものを抑える技術開発も同じく求められており, 暖房装置自体の稼働を極力抑えることでコストを下げる工夫が行われてきた(図1-2B)。

比較的小さな投資で取り組むことができる省エネルギー技術として, 暖房管理温度を変更するなど, 環境制御方法の改良がある。古在ら(1982)は, 温室管理システムにコンピュータを用いることで, 省エネルギーにつながることを示唆している。温室制御用コンピュータは, 日本でも複合環境制御として, 温室の制御に用いられてきた(島地, 1987)。オランダではコンピュータを用い, 温度, 湿度, 飽差, 光, CO_2 など様々な環境要因と, 作物の生育・生理を総合的に管理する制御方法を実施し, 最適な物質生産の両立を図っている(Kamp and Timmerman, 2004)。

暖房を部分的に行う局部加温により, エネルギーを削減する方法も報告されている。原ら(2010)は, バラの株元を温める株元加温で, 河崎ら(2011)はトマトの成長点付近を温風ダクトにより局部加温することで, それぞれ収量に影響を及ぼさず燃料を削減できることを報告している。

前述のように, 温湿度管理法の変更や局所暖房などの取り組みは, エネルギー削減には非常に有効であるが, 限界があ

ることは明白であり, 結局は熱源を必要とする暖房に依存せざるを得ない。しかし重油価格高騰による影響は避けられず, 施設園芸の脱石油化を更に推進するためには, 熱源の抜本的転換が必要である。

石油を使用しない温室・ハウスの暖房装置として, 地中熱交換装置がある(図1-2C)。山本(1973)は, 地中熱交換ハウスの温度環境及び熱特性について検討し, 使用したエネルギーに対して放熱するエネルギーが, ヒートポンプの成績係数(COP: Coefficient of performance)に勝ることを証明した。しかし, 北条と伊東(1982)は, トマト栽培の最低限界地温 10°C を維持するためには, 地中熱交換暖房だけでは困難であると報告している。また, 古在ら(1983)は, 水蓄熱方式による太陽熱利用温室について検討し, 放熱開始設定温度 13°C では節油率0.93と高い値を示したが, 暖房のために必要なエネルギー量である夜間暖房デグリーアワーが $100^{\circ}\text{C hr day}^{-1}$ の場合には, 補助暖房機が必要であると報告した。このように, 地中熱交換装置は画期的な省エネルギー型暖房装置であるが, 農林水産省の「園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査」によると, 1987年に全国で58haあった施設園芸における地中熱交換装置は, 2003年には7haにまで減少し, その後も増加していない。佐々木(1987)は, 地中熱交換装置の最大の問題点として温室・ハウス内の多湿環境を上げており, 多湿環境などの地上部環境条件が地中熱交換装置の普及を妨げている最大の理由と思われる。

石油の代替エネルギーとして, 施設園芸でも徐々に普及しているエネルギーに, 木質バイオマスがある。取り扱いが容易な木質ペレットの2011年の世界流通量は1600万tで, 日本においても2003年から2010年までの間に生産量が15倍に増加している(陣川ら, 2013)。また, 発熱量が多い高性能木質ペレットの開発も行われており, 今後の発展が期待できる(陣川ら, 2013)。施設園芸においても, 木質ペレット暖房機を用いた場合の環境特性が報告されている(國武ら, 2009)。しかしながら, 現時点における木質ペレット暖房機の価格は, 重油式暖房機の数倍と高価で(國武ら, 2009), また木質ペレットの供給元も限られているため, 今後の機器の低価格化や, 広範囲な木質ペレット供給体制が確立するまでは, 施設園芸において急激な利用増加も期待できない。

電気を用いた温室の暖房方法として, 小国(1982)や古在ら(1986a)は, ヒートポンプによる温室の環境調節について報告した。林ら(1983a)や神藤ら(1987a, 1987b)は, 温室におけるヒートポンプの効率を高めるために, 蓄熱層や集熱器を用いた暖房システムを提案した。1986年当時に施設園芸用に導入されたヒートポンプは, COPが高いという理由で, 地下水を熱源として利用した水-水型, または水-空気型ヒートポンプが主力であった(古在・林, 1986b)。1989年に佐々木(1989)

は、空気-空気型ヒートポンプによる温室暖房で、重油価格が65~85 円 L⁻¹ の条件で運転経費が石油と同等になると報告している。川嶋ら(2008)は、ヒートポンプは初期投資が大きくなることと、低温期の室外機の除霜運転時に、温室内の暖房機が停止することから、空気熱源式ヒートポンプと従来の重油式温風暖房機とを併用して使用するハイブリッドシステムの有効性を報告し、重油価格が55~68 円 L⁻¹ 以上で、ヒートポンプの初期投資額の回収が可能であると試算した。

ヒートポンプは、暖房だけでなく高温期の温室の夜間冷房や、除湿にも使用することができる(小国, 1982; 林ら, 1983b, 林; 2001)。ヒートポンプによる夜間冷房で、夏季の農産物の品質や収量が向上すれば、ヒートポンプの導入が、暖房費の軽減だけでなく、夏季の収益性の向上などに役立ち、年間を通して有効利用できることにもつながる。夜間冷房の有効性は、バラ、コチョウランやイチゴにおいて報告されている(川嶋, 2009)。

ヒートポンプの駆動方式は、電気式やエンジン式があるが、現時点ではコストの安い電気式が、施設園芸用として一般的に使用されている(林, 2009)。電気式ヒートポンプの電力源は電力会社に頼らざるをえない状況であるが、太陽光発電などを併設することで、再生エネルギーの利用は可能と思われる。

作物生産を最適環境に制御でき、高収益が可能な施設園芸を、将来にわたって継続するためには、冷暖房コストの削減と脱石油化を目指した暖房方式の開発が極めて重要である。

暖房費の削減には、前述のとおり、温室・ハウスの保温性の向上が有効であるが、単純に保温性を向上するだけでなく、光環境や湿度環境を、作物生産に適した状態にすることも同時に必要である。従って、保温性が高く低コストで光線透過率が高い被覆資材の開発などが今後とも必要となる。

次に、比較的導入コストが低くても、省エネルギーに役立つ方法として環境制御ソフトの改良があげられる。暖房管理温度を下げて、作物生産を維持できる End Of Day Heating (以下 EOD Heating と呼ぶ)(道園ら, 2012a, 道園ら, 2012b)など変温管理や、局所加温など個々の作物に対応した温度管理の開発などの研究が必要となる。

温室・ハウスの保温性の向上や、環境制御ソフトの改良を行っても、バラや温室メロンなどの高温管理作物は、暖房機器による加温は必要不可欠である。

施設園芸の暖房装置として約95%を占め現在の主な暖房装置である石油燃焼式の暖房機は、化石燃料である石油を燃料としており、持続的施設園芸を可能にするためには、石油などの化石燃料を使用しない暖房方法への、抜本的転換が必要である。

石油価格が高騰し、施設園芸における暖房費が増大する現状において、ヒートポンプと燃焼式温風暖房機を組み合わせ

たハイブリッドシステムは、将来的には太陽光発電と木質ペレットなどの、再生可能エネルギーと組み合わせる事も可能で、今後の持続的施設園芸構築の主役として、普及が大きいと期待される。

ヒートポンプの省エネルギーに対する有効性については、すでに論じられているが(小国, 1982; 古在ら, 1986a; 古在・林; 1986b; 佐々木, 1989; 川嶋ら, 2008)、実際に高温性の作物を栽培し、1年間の長期間で暖房費を比較した報告はない。

本報告では、高温性作物であるバラを用い、実際に営利栽培されるような条件下で1年間の長期間にわたり暖房費の削減効果と、バラの収量品質を比較した。また、ヒートポンプと太陽光発電を組み合わせ、施設園芸への再生可能エネルギー導入の可能性についても論じた。

第II章では、温室冷暖房ハイブリッドシステムの概要と、その制御方法および循環扇による温室環境均一化技術について記述した。

第III章では、重油式温風暖房機による暖房費、空気熱源式ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用したハイブリッドシステムを温室に導入した場合の暖房費削減効果、および温室の環境に与える影響について検討するために、同一規模の温室において、高温管理作物であるバラを栽培した条件で年間を通して比較した。また、夏季の夜間冷房を含めたハイブリッドシステムの年間のランニングコストのシミュレーションを行った(佐藤ら, 2013a)。

第IV章では、ハイブリッドシステムのバラ栽培への応用として、同一規模の温室で、ハイブリッドシステムによる冬季の暖房と夏季夜間冷房を組み合わせた温度制御と、慣行の重油式温風暖房機による暖房のみの環境制御において、1年間の長期間にわたりバラの収量、および切花長による階級別発生率などの品質、販売額、冷暖房経費を含めて、バラ栽培の経営に与える効果を検討した(佐藤ら, 2013b)。

第V章では、ハイブリッドシステム利用の応用として、バラ栽培温室でヒートポンプによる夜間冷房時と、慣行の温室内の水分動態を計測し、夜間冷房時における温室内の温度や湿度など環境要因の変化、バラからの蒸散とヒートポンプによる除湿量との関連について検討した(佐藤ら, 2014)。

第VI章では、ヒートポンプに用いる電力源として、再生可能エネルギーである太陽光発電を利用することにより、施設園芸の化石燃料依存からの脱却の可能性について検討した。

第VII章は総合考察として、ハイブリッドシステムの有効性、今後の再生可能エネルギーを利用した持続的施設園芸の確立について、またバラの収量品質への影響について、ハイブリッドシステムの他品目への応用および持続できる施設園芸の確立について論じた。

第Ⅱ章 温室冷暖房用ハイブリッドシステムの概要

ヒートポンプについて

ヒートポンプは、低温熱源から高温熱源を生み出す装置であり(林, 2009), 家庭用エアコンもヒートポンプである。施設園芸の用語として用いるヒートポンプは、一般的に農業用のエアコンの意味で使用されている。長谷川(2009)の試算では、COP4 のヒートポンプは、熱効率 90% の重油ボイラーと比較して約 39% も一次エネルギーを削減できる省エネルギー型の暖房装置である。

電気を動力源とするヒートポンプは、ランニングコストは安い、初期投資が高い。一般的に熱出力当たりの初期投資は、石油燃焼式加温機の 4～6 倍程度となる(馬場, 2007)。そのために、最大暖房負荷に合わせてヒートポンプを導入すると、初期投資が大きくなり回収が容易ではなくなる。馬場(2007)は、福岡市における外気温の累積出現時間を示し、最大暖房負荷のすべてをヒートポンプで補うのではなく、ヒートポンプの暖房では不足する場合にのみ既存の石油加温装置を併用する、ハイブリッドシステムを提案している。



写真 2-1 試験に用いたヒートポンプと重油式温風暖房機

ハイブリッドシステムの構成

温室の冷暖房用に使用するハイブリッドシステムは、石油式暖房機と電気式ヒートポンプを併用した装置である(写真 2-1)。そのために、すでに温室内に設置してある暖房機に、ヒートポンプを追加することでも導入可能であり、栽培農家の新たな投資金額を抑えることができる。

また、ヒートポンプの送風装置は従来の石油式暖房機と比較して送風量が少ないものが多いため、温室内の温湿度環境の均一性を図るため、循環扇を設置することが望ましい(写真 2-2)。



写真 2-2 試験温室に用いた循環扇

ハイブリッドシステムの制御法

このようなハイブリッドシステムが効率的に作動するためには、制御装置もハイブリッドシステムの特徴を、有効に制御できる機器の設置が望ましい。野々下(2009)は、ハイブリッド暖房運転の制御法として、設定気温以下になると、ヒートポンプが優先的に作動し、暖房負荷が大きくなった場合に、石油暖房機を運転する制御方法を提案している。この制御機器を用いることで(写真 2-3)、暖房費が効果的に削減できることを短期間の試験では証明しているが、年間を通してのハイブリッドシステムの有効性に関する検証はなく、本研究の中では高温管理作目であるバラを用いてシステムの有効性を明らかにする。



写真 2-3 試験に用いたハイブリッド制御盤 NT-600

ヒートポンプは、暖房のみでなく、温室の夜間冷房が可能である。ハイブリッドシステムとした場合、年間を通した温室の制御方法は、従来の暖房のみでなく、夜間冷房、除湿を含めた新たな制御方法となる。バラ栽培へのヒートポンプ導入に当たっては、これらの検証も必要である。

年間を通したハイブリッドシステムの運転方法は、作物の生育適温よりも気温が低下する冬季にはヒートポンプは暖房機として使用し、夏季高温期には夜間冷房、梅雨期や秋雨の時期にはヒートポンプを冷房モードで除湿機として使用する(図2-1)。温室内の除湿には、冷房運転のみで行う場合と、冷房だけでは気温が低下し作物の生育適温以下になる場合は暖房機と同時に稼働する方法がある。

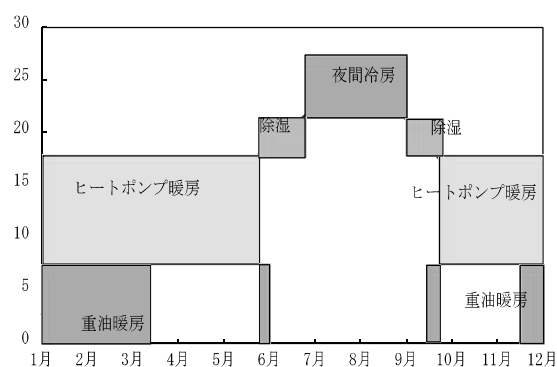


図2-1 ヒートポンプと重油暖房機によるハイブリッドシステムの温室冷暖房制御概念図

* 図中の最低気温は、静岡県浜松市における月単位の最低気温の平年値。除湿時における暖房機作動は冷房、暖房同時運転による除湿を表す。

外気を熱源とするヒートポンプは、外気温が8℃以上であればヒートポンプのみの暖房でも効率的に行うことができる。

川嶋ら(2008)は外気温が8℃以下になるとヒートポンプの熱負担割合が小さくなると報告しており、8℃以下の気温になった場合は、石油暖房を併用することがハイブリッドシステムの基本的制御と考えられる(図2-1)。

施設園芸におけるハイブリッドシステムは、川嶋らの短期間の試験により有利性が証明されているが(川嶋ら, 2008), 図2-1のハイブリッドシステムの制御概念図のように年間を通してのコスト分析は行われていない。

施設園芸農家が実際にハイブリッドシステムを導入するにわたっては、正確な比較試験が必要になる。次章から最低管理温度18℃のバラを用いて、ハイブリッドシステムと、慣行の重油暖房機のコスト比較、バラの収量・品質などを比較することで、ハイブリッドシステムの有効性について検討した。

温室内における循環扇の効果について

温室内で均一な品質の作物を栽培するためには、温室内の温度や湿度、光量などが同一な条件が望ましい。農業用のヒートポンプは、コスト削減のため店舗用のヒートポンプを流用していることが多い。石油燃焼式暖房機は風量が多く、本研究で使用した発熱量56.8 kWの重油燃焼式暖房機(ネボン株, HK-2027)は、95 m³ min⁻¹の風量のファンを装備している。一方、本試験で使用したヒートポンプは、施設園芸用に改造してあるものの風量は80 m³ min⁻¹と少ない。店舗用のエアコンをそのまま温室用に流用して使用している栽培者もあるが、店舗用のエアコンの風量は30 m³ min⁻¹程度(ゼンエエアコン FDFXP1603HAG4AG, 三菱重工空調冷暖株)とかなり風量が少ない。そこで、温室内に循環扇を設置し、温室内環境の均一化を測った。

材料および方法

測定は静岡県農林技術研究所内のフェンロー型温室(床面積259.2 m², 間口9.6 m, × 奥行27 m, 軒高4.8 m)で行った(写真4-1)。温室内の中央部に循環扇(ボルネドファン 株山本産業, 写真2-2, 図2-2)を2mの高さに3機設置し、循環扇を稼働した状態と停止した状態で、温室内の1.5 mの高さの風速を測定した。

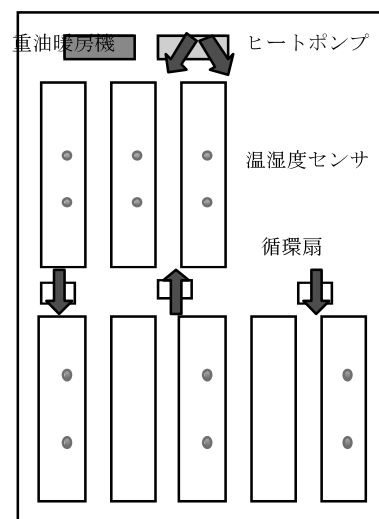


図2-2 試験温室における暖房機、温度センサの配置図

測定は2007年6月15日に、3次元超音波風速計(KAIJO WS-590, 株カイジョー)を用いて行った。測定はヒートポンプを送風した状態で行い、送風はヒートポンプ上部のダクトから温室の側面2方向に向けた状態で送風した(図2-2)ヒートポンプは、電気駆動で定格暖房能力14 kW, 風量80 m³ min⁻¹(FDUP1402HM 改, 三菱重工業株)のものを使用した(写真2-1)。

温湿度はカードロガー(MR6662, 株チノー)を用い、10分

間隔で測定した。センサ部は、風速約 3 m s^{-1} で常時通風している筒状容器内に設置した。センサは温室内の 1.5 m の高さに9箇所設置した。測定は2007年11月1日から11月10日まで行い、9箇所の温度を測定した。

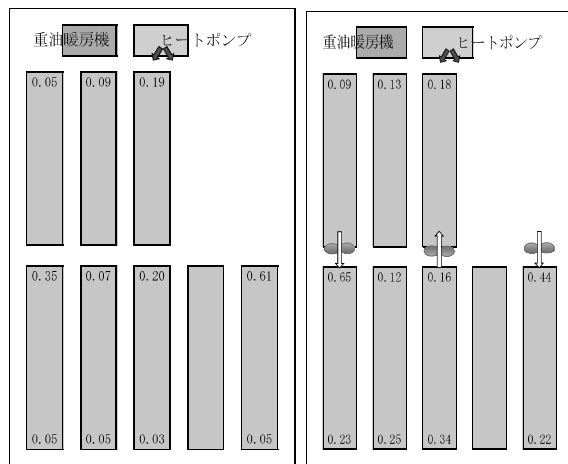
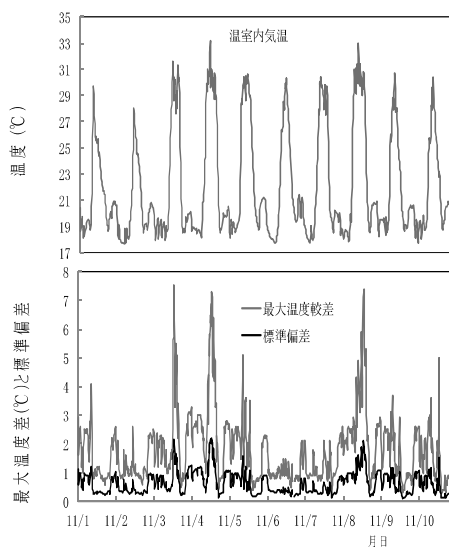


図2-3 循環扇の有無による温室内の高さ 1.5 m の風速分布の変化(ヒートポンプの送風機を稼働。送風方向は矢印のとおり。)



* 図2-4 循環扇稼働時における温室室内気温平均値、最大温度較差、標準偏差

結 果

ヒートポンプの送風機のみ稼働し、循環扇を稼働しない場合の風速を図2-3に示した。ヒートポンプのダクトは側面の方向に向いているため、温室中央両側面の風速が、 0.35 m s^{-1} 、 0.61 m s^{-1} と比較的大きな値となっていた。一方ヒートポンプから最も遠方にあたる温室の向かい側の側面における風速は、 0.05 m s^{-1} 以下で風がほとんど到達していない状況であった(図2-3)。循環扇を稼働させると、温室全体的に風速が大きくなった(図2-3)。特に循環扇を稼働させない時は、風速

0.05 m s^{-1} 以下であった向かい側の側面は 0.25 m s^{-1} 以上になり、ヒートポンプから最も離れた場所での風速も大きくなり、温室内の空気が移動していることが確認された。

実際にヒートポンプ稼働時に、循環扇を稼働し温室内の温度分布状況について計測した結果、11月の日中の温度較差は最大 8°C あり大きかった(図2-4)。11月1日と2日の比較の日中の気温上昇が少ない時は温度較差が小さく、温度の標準偏差も小さいため、これらは温室骨材の影響など、温度計近辺の日射量が影響を与えていると推測された。夜間の温室室内気温の温度較差は 3°C 以下、標準偏差は 1°C 程度であり、温度条件はほぼ均一化していると推測された。

考 察

ヒートポンプを導入する場合には、コスト削減のため一般に数多く流通しているヒートポンプを流用することが有効である。しかしながら、店舗用のエアコンは風量が少ない。施設園芸用に用いている石油燃焼式暖房機は、風量が多いものが多く吐出口にダクトをつなげ、暖房機から離れた位置においても温度が均一になるよう工夫して用いている。高倉は(1982)、米国農業工学会における温室の冷暖房と換気に関する基準について報告し、温室の奥行きが 20 m 以上で 40 m 以下の場合、温風機のファンでは水平方向に連続的な空気循環のパターンを十分作ることとはできないため、温室の中央にファンを追加することを奨励している。同報告で植物を横切る風は 1 m s^{-1} 以下にすべきとしている。

今回試験に用いたヒートポンプは、施設園芸用に改造してあるため風量 $80 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ と比較的風量が多い機種であったが、循環扇のない状態ではヒートポンプから最も離れた位置での風速は 0.05 m s^{-1} 以下であり空気の循環はほとんどないものと推測された。循環扇を稼働することで、離れた位置での風速も 0.25 m s^{-1} 程度になり、空気の循環も行われ温度の均一化が図られると推測された。

循環扇を稼働させ、11月に温室内の温度推移を調査した結果、ヒートポンプ稼働時である夜間の温室室内気温の最大温度較差は 3°C 以下、標準偏差は 1°C 程度であり温度の均一化が図られていた。石井ら(2012)も、温室内における循環扇の設置が、温室の環境改善効果や暖房時の加温管理改善効果が期待できるとし、循環扇の適切な配置について報告している。温室内に3つの循環扇を設置し対面する2つの循環扇の中央部の反対側に、逆流する循環扇を用いることで、2つの循環流が起こることを示した。今回の循環扇の設置についても、温室内に2つの循環流が起こると思われ、それらによりヒートポンプよりも離れた場所における風速を増大させたと考えられる。

第Ⅲ章 温室冷暖房用ハイブリッドシステムの暖房費削減効果

切花生産のためのバラの栽培適温は、日中が23～25℃、夜間は16～17℃であり(林勇, 1998), 切りバラ栽培では, 2003年頃から夏季の冷房用に導入されたヒートポンプを, 2005年以降に暖房用に使用することがきっかけで, バラ栽培で導入が広がったとされている(福井, 2010)。

重油価格が65～85 円 L⁻¹を超えた2008年の以降, 空気熱源式ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用するハイブリッド暖房方式が, バラ栽培を中心に導入され始め, 農林水産省の「園芸施設及び農業用廃プラスチックに関する調査」によると, 2009年には国内の花き栽培施設で97.2 ha, 野菜栽培施設で約35.7 ha, 果樹栽培施設で15.5 haの計148.4 haの園芸施設でヒートポンプが導入され, 2007年における13 haと比較すると11倍以上と飛躍的に増加した。

従来のヒートポンプの温室利用への有効性に関する研究報告は, 短期間の暖房コストや環境条件の比較が多く(川嶋ら, 2008; 森口ら, 1990), 同一規模の温室において作物を栽培した条件で, 年間を通して重油式温風暖房機による暖房費と, 空気熱源式ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用した, ハイブリッドシステムによる暖房費を比較した報告はないため, 高温管理作物であるバラ栽培条件下で, 重油使用料, 電気使用量を測定し, 暖房費の比較を行なった。合わせて, 夏季の夜間冷房を含めた, ハイブリッドシステムの年間のランニングコストのシミュレーションと, バラの収量について比較検討した。

材料および方法

1) 試験区の設置方法, 試験期間

ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用する「ハイブリッド区」と, 重油式温風暖房機のための「対照区」を, 静岡県農林技術研究所内のフェンロー型温室(写真4-1)の中央部を, ガラス戸で分割することで設定した(図3-1)。

各処理区には循環扇を設置し(写真2-2, 図3-1), 常時運転した。ここでは, 冷暖房機器が稼働する18時から翌日の8時までを夜間とし, 8時から18時までを日中とした。冷暖房機器の作動していない日中は, 中央部のガラス戸を開放し, 冷暖房装置の稼働する夜間の時間帯のみ, 中央部のガラス戸で仕切った。なお, 日中の時間帯でも, 天候等の影響により暖房機が稼働するときには, 中央部のガラス戸を閉鎖した。床面積は, ハイブリッド区, 対照区ともに, 259.2 m² (間口9.6 m × 奥行27 m), 軒高4.8 mで同一である。暖房時には両区

とも暖房を行っているため, 熱の移動は無いものと仮定し, 対照区と中央部の仕切りの表面積は含めず, ハイブリッド区の表面積は504.4 m²として評価した。夏季高温期における対照区は, 夜間も窓を開放した状態となる。ハイブリッド区の夜間冷房時における表面積は, 処理区中央部の仕切り部分の面積を加えた634.0 m²を用い評価した。

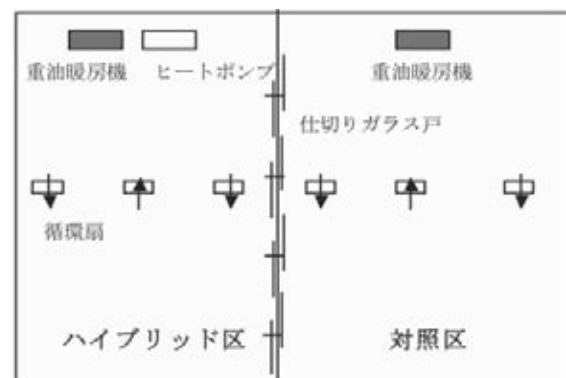


図3-1 試験温室における処理区の配置図

ハイブリッド区の空気熱源式ヒートポンプ(FDUP1402H M改, 三菱重工業(株))は, 電気駆動で定格暖房能力14 kWのものを使用した(写真2-1)。ヒートポンプの暖房能力を, 床面積1000 m²のフェンロー型温室(温室表面積1770.9 m²)に表面積換算すると, 49.2 W m⁻²相当となる。ハイブリッド区の重油式温風暖房機(HK-2027, ネボン(株))は, 暖房能力56.8 kW (熱出力64.6 kW, 効率88.0%)のものを用了。同様に床面積1000 m²のフェンロー型温室に換算すると, 暖房能力は199.4 W m⁻²相当となる。ヒートポンプの定格冷房能力は12.5 kWであり, 床面積1000 m²のフェンロー型温室へ表面積換算すると, 34.9 W m⁻²相当となる。対照区の暖房には, 重油式温風暖房機(HK-1522, ネボン(株))を使用した(暖房能力38.0 kW, 熱出力44.2 kW, 効率86.0%)。床面積1000 m²のフェンロー型温室へ表面積換算すると, 暖房能力133.4 W m⁻²相当となる。試験期間は, 2009年6月1日から2010年5月31日までとした。

温室の暖房温度設定は, ハイブリッド制御盤(NT-600, ネボン(株), 写真2-3)を用いて行った。ハイブリッド制御盤は, 馬場(2007)および野々下(2009)の概念に基づき, 暖房時の温度が低下するとヒートポンプが先に稼働しランニングコストを抑え, ヒートポンプの熱量では賄えない低温になると, 石油式温風暖房機が稼働して設定温度を維持するという機能を備

えている。また、夏季の高温期には冷房および除湿のコントロールも可能であり、ハイブリッド冷暖房システムを有効に活用できる制御装置である。

暖房期間の設定温度は、時間帯別に18～22時は22℃、22～6時は18℃、6～18時は20℃とした。ヒートポンプによる夜間冷房は、2009年8月1日～9月15日に行った。夜間冷房の設定温度は、21～0時が22℃、0～7時を20℃とした。夜間暖房時は、ハイブリッド区、対照区とも温室上部を2層カーテン(上部：アルミカーテンPH-66、下部：不織布カーテンLS-10S、ともに(株)誠和)、温室側面を1層カーテン(不織布)で被覆し、夜間冷房時は、ハイブリッド区のみ温室上部2層、側面1層カーテンで覆った。夜間冷房時の対照区は、換気温度20℃に設定した天窓、側窓の開閉のみで温度制御した。暖房時における対照区の暖房設定温度は、ハイブリッド区と同様の設定とした。

2) 暖房負荷、温湿度の計測

ハイブリッド区と対照区の暖房費を比較するために、両区の温室の暖房負荷を計測した。暖房負荷は、冬期に重油式温風暖房機のみを用いて夜間暖房し、重油使用量、内外気温差から下記のEq.(3-1)、(3-2)を用いて算出した。重油消費量は、油量計(RE1-LE、日東精工(株))とパルスロガー(RVR-52、ティアンドデイ(株))で、温湿度はカードロガー(MR6662、(株)チノー)を用い、10分間隔で測定した。センサ部は、風速約3 m s⁻¹で常時通風している筒状容器内に設置した。測定は、2009年12月の夜間に行った。

$$U = Qh \times 10^6 / ((T_{in} - T_{out}) \times A \times t \times 3600) \quad \text{Eq. (3-1)}$$

$$Qh = QhA \times \eta \times V \quad \text{Eq. (3-2)}$$

U : 暖房負荷係数(W m⁻² K⁻¹)、 Qh : 発生熱量(MJ)、 T_{in} : 室内気温(℃)、 T_{out} : 外気温(℃)、 A : 温室表面積504.4(m²)、 t : 暖房時間(h)、 QhA : A重油発生熱量36.7(MJ L⁻¹)、 η : 重油式温風暖房機効率(ハイブリッド区0.88、対照区0.86は排ガス損失法(JIS A 4003)で測定した値)、 V : A重油消費量(L)、3600: 3600(sec)

3) 消費電力、重油使用量の計測

使用重油量および消費電力から換算した冷暖房費は、温室面積1000 m²、温室表面積1770.9 m²のフェンロー型温室に表面積の比率で換算した後、温室面積1 m²当たりのシミュレーションの値として使用した。ヒートポンプおよび重油式温風暖房機の消費電力は、個々に交流電力モニタ(富士電機システムズ(株)、PPMCFBR2-M)で測定した。電気料金は中部電力(株)の、低圧季節別時間帯別電力料金(2010年: 夏季日中(7

～23時、7～9月)12.95 円 kW⁻¹ h⁻¹、その他の季節11.77 円 kW⁻¹ h⁻¹、夜間(23～7時)9.33 円 kW⁻¹ h⁻¹、基本料金は月額1037.4 円 kW⁻¹)で試算した。

年間の暖房費の試算のためのA重油価格には、2009年6月から2010年5月の小型ローリーA重油全国平均価格(経済産業省資源エネルギー庁、石油製品価格調査、<http://www.e-necho.meti.go.jp/info/statistics/sekiyukakaku/sekiyukakaku3.htm>、2012年8月16日参照)の平均値65.8 円 L⁻¹を使用した。

4) 暖房時期の温室内温度差の補正方法

ハイブリッド区と対照区の暖房時の温度管理は同一になるように設定したが、温室内の温度測定により処理区で温度差が発生した場合は、温度低下を重油式温風暖房により補うと仮定し温度差を補正した。温度補正のための油量の算出には、以下の式Eq.(3-3)を用いた。

$$VF = (Thi - Tlo) \times H \times 3600 \times D \times U \times A / (QhA \times 10^6 \times \eta) \quad \text{Eq. (3-3)}$$

VF : 補正A重油量(L)、 Thi : 高温区夜間平均温度(℃: 18時～8時)、 Tlo : 低温区夜間平均温度(℃: 18時～8時)、 H : 暖房時間(14 h day⁻¹: 18時～8時)、 D : 日数(days)、 U : 暖房負荷係数(W m⁻² K⁻¹)、 A : 温室表面積(m²)、 QhA : A重油発生熱量36.7(MJ L⁻¹)、 η : 暖房システム利用効率。

5) CO₂発生量の算出

電力の消費によるCO₂発生量の算出は、環境省が公表している(平成21年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について、<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13319>、2012年8月16日参照)、中部電力の調整後排出係数115.8 × 10⁶ g J⁻¹を用いた。A重油からCO₂発生量の算出は、環境省が作成している「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」から、単位発熱量39.1 MJ L⁻¹と排出係数0.0693 kg CO₂ MJ⁻¹(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、http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/guide/pdf1_6/mat_01.pdf、2012年8月16日参照)を乗じた値の、2.71 kg CO₂ L⁻¹を用いた。

6) バラの栽培概要

2005年4月20日に5.692 株 m⁻²の密度で、バラ品種‘ローテローゼ’(*Rosa hybrida* L. ‘Asami Red’, 写真4-2)を定植した。栽培方式は、ポリフェノール培地による養液栽培で、仕立て法は全枝折り曲げ法(アーチング栽培法、以下アーチング栽培)とした。収穫期間は、2009年6月から2010年5月まで連続で行った。培養液処方、NO₃-N:11.6、P:3.5、K:5.7、Ca:6.6、Mg:2.0 (me L⁻¹)、微量元素はFe:3、Mn:0.5、

B:0.3, Cu:0.04, Zn:0.1, Mo:0.02 (ppm)を用いた。

結 果

1) 温室の暖房負荷係数

2009年12月14～17日までに計測した暖房負荷係数は、測定日により変動したが、 $3.4 \sim 3.9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ と変動幅は小さかった。3回の測定による平均値は、ハイブリッド区が $3.66 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 、対照区が $3.70 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ でほぼ同様の値であり、両区は同一の保温条件であった(表3-1)。

2) ハイブリッド区と対照区の温湿度環境

試験温室内の1年間の平均気温は、ハイブリッド区で 22.7°C 、対照区は 22.7°C と同様であった。日中の時間帯の年平均気温は、ハイブリッド区で 25.6°C 、対照区は 25.6°C で、年平均の日中気温もほぼ同一の温度であった(図3-2)。各処理区の月別平均値を比較すると、8月のハイブリッド区の夜間平均気温は、ヒートポンプによる夜間冷房の効果で約 2.2°C 低下した(図3-2、表3-2)。対照区の7～9月の気温は、外気温と同一温度であった。冬期(12～2月)の対照区の夜間気温は、暖房能力がやや低かったためハイブリッド区よりも低く、最も差があった1月では、夜間の平均気温がハイブリッド区よりも 1.6°C 低かった。

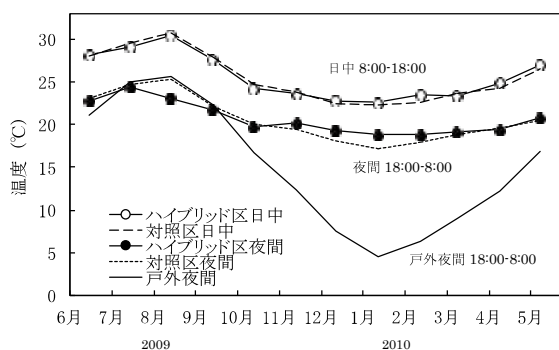


図3-2 ハイブリッド区と対照区の日中(8時～18時)と夜間(18時～8時)の月別平均気温

表3-1 ハイブリッドシステム区と対照区の暖房負荷係数^z

処理区	2009年12月 における日	暖房計測期間 時刻	時間	重油消費量 L	発生熱量 ^y MJ	戸外平均気温 ℃	室内平均気温 ^x ℃	暖房デグリーアワー ^w deg h	暖房負荷係数 ^v $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	戸外風速 m s^{-1}
ハイブリッド 区	14-15	16:50 -	15.2	40.5	1,308	6.7	19.7	198	3.65	0.8
	15-16	16:40 -	15.3	44.0	1,423	5.9	19.7	211	3.71	1.0
	16-17	16:40 -	15.5	51.7	1,672	3.5	19.9	254	3.62	0.9
	平均		15.3	45.4	1,468	5.4	19.8	221	3.66	0.9
対照区	14-15	16:50 -	15.2	34.7	1,091	6.7	18.4	178	3.38	0.8
	15-16	16:40 -	15.3	40.9	1,288	5.9	18.0	185	3.83	1.0
	16-17	16:40 -	15.5	48.5	1,525	3.5	17.4	215	3.90	0.9
	平均		15.3	41.4	1,301	5.4	17.9	193	3.70	0.9

^z 暖房負荷係数は、面積 259.2 m^2 、表面積 504.4 m^2 の温室内で重油式温風暖房機のみを用いて計測した。

^y 暖房負荷 = A重油発生熱量 (36.7 MJ L^{-1}) × 重油消費量 (L) × 暖房システム利用効率 (ハイブリッド区 0.88, 対照区 0.86)。

^x A平均気温は、1.5mの高さの温室室内9箇所の平均値。

^w 暖房負荷 = (室内平均気温 $^\circ\text{C}$ - 戸外平均気温 $^\circ\text{C}$) × 時間 (h)。

^v 暖房負荷係数 = 発生熱量(J) / (暖房デグリーアワー × $3600 \times$ 温室表面積 (504.4 m^2))。

温室内の夜間の相対湿度は、年間を通してハイブリッド区で低く推移した(図3-3)。8月のハイブリッド区の温室湿度は夜間冷房の影響で83%と、対照区の90%と比較して低かった。ハイブリッド区の年間平均の相対湿度は72.9%で、対照区の年間平均相対湿度76.1%と比較して低い傾向であった。12～2月までは、月平均湿度もハイブリッド区の相対湿度が低い傾向であった。冬季の夜間の相対湿度の低下は、ハイブリッド区の気温が高かったことも要因として考えられる。

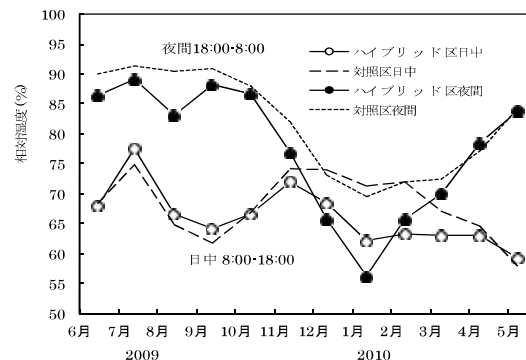


図3-3 ハイブリッド区と対照区の日中(8時～18時)と夜間(18時～8時)の月別平均相対湿度

3) 年間消費電力量、重油使用量

ハイブリッド区と対照区の暖房時の温度管理は同一になるように設定したが、温室内の温度測定の結果、対照区の暖房能力がやや低かったため、冬季の夜間温度は対照区で低く、1月の平均夜間気温は 1.6°C 低かった(図3-2、表3-2)。

Eq.(3-3) から算出した補正の重油量を、表3-2に示した。11～3月および5月は対照区の夜間温度が低く、対照区の補正油量を加え、6、10月および4月はハイブリッド区の温度が低かったためハイブリッド区に補正油量を加えた。また、ヒートポンプで夜間冷房を行う8～9月、および暖房機の作動しない7月は、温度補正は行っていない(表3-2)。

ハイブリッド区と対照区において実測した消費電力量と重油使用量を、フェンロー型温室面積 1000 m^2 (温室表面積

表3-2 バラ栽培におけるハイブリッド区と対照区の年間冷暖房用電力・A重油使用量(2009年6月～2010年5月 静岡県磐田市)²

項目	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
平均夜間温度(°C)	22.7	24.4	23.1	21.7	19.8	20.2	19.3	18.8	18.9	19.1	19.5	20.9	
暖房用ヒートポンプ消費電力(MJ m ⁻²)	0.12	0.00	0.00	0.02	0.28	1.66	2.20	2.22	1.70	1.86	1.47	0.81	12.34
冷房用ヒートポンプ消費電力(MJ m ⁻²)	0.00	0.00	1.02	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32
重油暖房機消費電力(MJ m ⁻²)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.21	0.34	0.23	0.19	0.15	0.05	1.25
A重油消費量(L m ⁻²)	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11	0.84	2.77	3.97	2.70	1.70	0.26	0.01	12.38
A重油補正量 ³ (L m ⁻²)	0.11	-	-	-	0.08	-	-	-	-	-	0.04	-	0.23
補正後A重油消費量(L m ⁻²)	0.13	0.00	0.00	0.00	0.19	0.84	2.77	3.97	2.70	1.70	0.30	0.01	12.61
ヒートポンプ投入熱量 ⁴ (MJ m ⁻²)	0.45	0.00	-	0.08	1.06	6.29	8.34	8.41	6.44	7.05	5.57	3.07	46.76
ヒートポンプ投入熱量/投入総熱量(%)	(58)				(69)	(75)	(55)	(46)	(49)	(62)	(88)	(99)	(60)
A重油発熱量 ⁵ (MJ m ⁻²)	0.32	0.00	-	-	0.47	2.09	6.91	9.90	6.73	4.24	0.75	0.02	31.43
A重油発熱量/投入総熱量(%)	(42)				(31)	(25)	(45)	(54)	(51)	(38)	(12)	(1)	(40)
熱エネルギー換算投入熱量(MJ m ⁻²)	0.77	0.00	-	0.08	1.53	8.38	15.25	18.31	13.17	11.29	6.32	3.09	78.19
平均夜間温度(°C)	23.1	24.8	25.3	22.2	20.0	19.4	18.0	17.2	17.9	18.9	19.6	20.5	
重油暖房機消費電力(MJ m ⁻²)	0.01	0.00	0.00	0.00	0.11	0.12	0.27	0.25	0.14	0.09	0.11	0.03	1.13
A重油消費量(L m ⁻²)	0.45	0.00	0.00	0.06	1.33	2.76	5.36	6.80	5.00	4.30	2.80	2.93	31.79
A重油補正量 ³ (L m ⁻²)	-	-	-	-	-	0.24	0.43	0.54	0.28	0.08	-	0.13	1.70
補正後A重油消費量(L m ⁻²)	0.45	0.00	-	0.06	1.33	3.00	5.79	7.34	5.28	4.38	2.80	3.06	33.49
熱エネルギー換算投入熱量(MJ m ⁻²)	1.10	0.00	-	0.15	3.24	7.31	14.11	17.89	12.87	10.67	6.82	7.46	81.62

² ヒートポンプは、8月1日から9月15日まで夜間冷房で運転し、その他の時期は暖房運転した。

³ A重油補正量 = 夜間気温差 × 暖房負荷係数 × 温室表面積 × 時間 / (A重油発熱量 × 暖房システム利用効率)

⁴ ヒートポンプ投入熱量 = 消費電力(J) × ヒートポンプのCOP(3.79)

⁵ A重油発熱量 = A重油発熱量(36.7 × 10⁶ J L⁻¹) × 暖房システム利用効率(ハイブリッド区0.88, 対照区0.86)。

1770.9 m²へ表面積換算した後、温室面積1 m²当たりとして表3-2に示した。月別の投入エネルギー量は、ハイブリッド区対照区ともに暖房の使用時期である冬季の量が多かった(表3-2, 図3-4)。8,9月はハイブリッド区では夜間冷房を行ったため、電力の投入エネルギーがあったが、暖房時に比較すると少ない値であった。夜間冷房の時期を除いた月では、ハイブリッド区の投入エネルギーは対照区の投入エネルギーをよりも少なかった(表3-2, 図3-4)。ヒートポンプに要した年間消費電力量は暖房用12.34 MJ m⁻²、冷房用に1.32 MJ m⁻²、年間消費電力は合計13.66 MJ m⁻²で、ハイブリッド区の重油式温風暖房機による年間消費電力量1.25 MJ m⁻²を加えると、年間消費電力量は14.91 MJ m⁻²であった。対照区の重油式温風暖房機の年間消費電力量は1.13 MJ m⁻²であった。A重油の年間消費量は、ハイブリッド区は12.61 L m⁻²であり、対照区33.49 L m⁻²の約38%であった(表3-2)。

これらの値から夜間冷房用に使用した電力を除き、温室暖房に投入したエネルギー量を比較すると、対照区が81.62 MJ m⁻²であるのに対して、ハイブリッド区は、ヒートポンプ消費電力が12.34 MJ m⁻²と、重油式温風暖房機による31.43

MJ m⁻²を加えた43.77 MJ m⁻²であり、投入エネルギーは対照区よりも37.85 MJ m⁻²少なかった。重油式温風暖房機の消費電力は、熱エネルギーとして利用される値は小さいため除外した。また、循環扇や窓の開閉などの電力も加えていない。供試したヒートポンプの暖房定格条件下のCOP(室外の乾球温度7°C,湿球温度6°C,室内の乾球温度20°C)である3.79を用い、消費電力を熱エネルギーに変換して両区の比較をした(表3-2,図3-5)。その結果、ハイブリッド区が78.19 MJ m⁻²と、対照区の81.62 MJ m⁻²よりも小さな値であり、今回の条件では、ヒートポンプは暖房定格条件下における能力以上の能力を発揮していると推測された。ハイブリッド区の熱エネルギーを、対照区と同一の81.62 MJ m⁻²にするヒートポンプのCOP値は4.06であった。

ハイブリッド区における、ヒートポンプの暖房負担割合は、外気温の低い1月で46%、外気温が高い4月以降は88%以

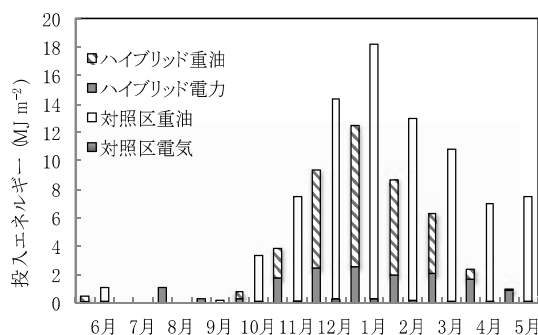


図3-4 ハイブリッド区と対照区の月別投入エネルギー

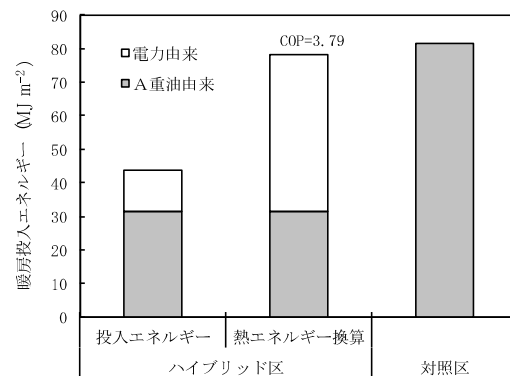


図3-5 ハイブリッド区と対照区の年間投入エネルギーと熱量

表3-3 バラ温室におけるハイブリッド区と対照区の2009年6月から2010年5月までの冷暖房費（磐田市）²。

項 目	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	合計
ハイブリッド区 電気料金 (円 m ⁻²)	28.5	17.4	54.9	29.1	32.0	86.6	114.1	119.8	95.6	100.0	83.2	52.8	814.0
ハイブリッド区 A重油料金 ³ (円 m ⁻²)	8.5	0.0	0.0	0.0	12.9	55.3	182.5	261.0	177.9	111.9	20.1	0.7	830.8
ハイブリッド区 合計金額 (円 m ⁻²)	37.0	17.4	54.9	29.1	44.9	141.8	296.6	380.8	273.5	211.8	103.3	53.4	1644.5
対照区 電気料金 (円 m ⁻²)	4.6	4.1	4.1	4.1	8.1	11.6	16.3	17.9	16.0	15.2	12.3	12.3	126.6
対照区 A重油料金 ³ (円 m ⁻²)	28.5	0.0	0.0	4.0	85.1	176.4	343.2	435.5	319.9	275.6	179.5	187.7	2035.4
対照区 合計金額 (円 m ⁻²)	33.1	4.1	4.1	8.1	93.2	188.0	359.5	453.4	335.9	290.8	191.8	200.1	2162.1

² 暖房設定温度は18℃。ハイブリッド区の冷房設定温度は20℃（冷房期間は8月1日から9月15日）

ハイブリッド区と対照区の温度差を重油消費量で補正した。

³ A重油単価は65.8 円 L⁻¹

上であった(表3-2)。2009年6月は、夜間の平均気温が対照区で高かったために、補正重油使用量が多くなり、ヒートポンプの暖房負担割合は58%と低かった。

4) 年間冷暖房経費

表3-2のバラ栽培温室における年間冷暖房用電力・A重油使用量から、実勢価格として2009年6月～2010年5月までの試験期間中における、小型ローリーA重油全国平均価格65.8 円 L⁻¹を用い、冷暖房コストを比較した(表3-3, 図3-6)。年間の冷暖房費は対照区の2162 円 m⁻²に比較して、ハイブリッド区は1645 円 m⁻²で、約24%(517 円 m⁻²)の暖房費が削減された。

夏季の夜間冷房を行った期間は、8月1日から9月15日までであり、9月15日以降のヒートポンプは暖房用として使用した。夜間冷房を行った8月の午後6時から午前8時までの平均気温は、ヒートポンプ区で23.1℃で、対照区の25.3℃と比較すると2.2℃低下した(表3-2)。9月の暖房用に使用したヒートポンプの電力は、9月の消費電力の6%とわずかであった。8、9月の2ヶ月におけるヒートポンプの電気料金は、84 円 m⁻²であり、ハイブリッドシステムの年間冷暖房費の5%程度と少なかった(図3-6)。

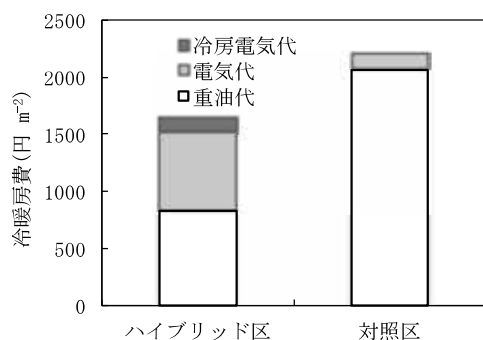


図3-6 ハイブリッド区と対照区の年間冷暖房費試算結果
A重油単価は65.8 円 L⁻¹、電気料金は2009年時の中部電力株式会社の電力料金タイムプランL（低圧季節別時間帯別電力）で試算

5) CO₂発生量の比較

ヒートポンプによるハイブリッドシステムを導入する上で、もう1つのメリットは、同一の暖房条件でもCO₂発生量が削減

減できることである。表3-2に示した年間の消費電力量、消費重油量からCO₂の発生量を算出した結果、対照区の年間CO₂排出量が、92.5 kg m⁻²であるのに対して、ハイブリッド区は56.6 kg m⁻²で、年間のCO₂排出量は約39%削減できた(図3-7)。

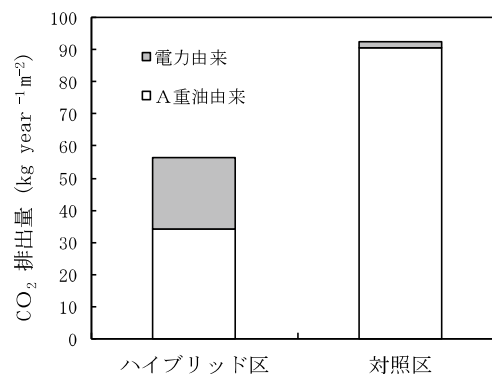


図3-7 ハイブリッド区と対照区の年間CO₂排出量

考 察

1) 冷暖房比較の条件について

温室の暖房負荷係数は、ハイブリッド区が3.66 W m⁻² K⁻¹、対照区が3.70 W m⁻² K⁻¹とほぼ同一の値であり、同一の保温性能を持つ温室の冷暖房コストの比較であると言える。

床面積 259.2 m²と一般農家のバラ栽培温室と比較してやや小さな規模のため、温室の表面積と床面積の比率は1.95で、1000 m²規模のフェンロー型温室の表面積床面積の比率1.77(間口38.4 m, 奥行27.0 m, 軒高4.8 m)と比較するとやや大きな値であるが、より大きな実用規模の温室で評価する場合に、冷暖房の削減率を過大評価する可能性は低い。

両処理区は、日中は中央のガラス戸(仕切り)を開放するため、年間を通してほぼ同様の温度で推移したが、夜間温度は制御システム・暖房能力などが異なるため、11月から翌年の3月にかけて対照区の夜間温度が低かった。最も温度差が大きかった1月の夜間の平均気温は、対照区で1.6℃低かった。対照区との重油消費量を同一温度で比較するために、月単位で温室の温度差、暖房負荷係数を用いて、温度が低かった処理

区をA重油で暖房すると仮定し補正した、両区の暖房使用エネルギーの比較は、同一温度条件下での比較と判断した。

2) ハイブリッドシステムによる投入エネルギーの比較

ヒートポンプの暖房定格条件下におけるCOPである3.79を用い、消費電力を熱エネルギーに変換し、重油式温風暖房機によるA重油の発熱量と合わせて、両区で使用した熱エネルギーの比較をした結果、ハイブリッド区は78.19 MJ m²、対照区は81.62 MJ m²とややハイブリッド区で少なく、本試験条件下では、ヒートポンプは定格能力以上の暖房能力を発揮したと推測した。ハイブリッド区と対照区を、同一熱エネルギーにするヒートポンプのCOPは4.06であった。暖房定格時のCOPは、JIS規格による室外乾球温度7℃、室外湿球温度6℃、室内乾球温度20℃の一定条件下の値であるが、8、9月を除く1年間の長期間にわたる栽培期間においてもCOPは4.06と推測され、1月の夜間の外気平均気温が4.5℃(表3-2, 図3-2)である静岡県のような、暖地におけるヒートポンプの利用の有効性を示している。

暖房のために温室へ投入したエネルギーは、ヒートポンプを併用したハイブリッド区は43.77 MJ m²で、対照区の81.62 MJ m²と比較して46%削減でき、温室暖房の投入エネルギーを大幅に削減できることが明らかとなった(図3-5)。

また、ヒートポンプによる8、9月の夜間冷房のエネルギーを加えた場合でも、ハイブリッド区の年間の投入エネルギー量は45.09 MJ m²で、対照区の81.62 MJ m²と比較して大幅に少ない。

夏季の夜間冷房に使用するヒートポンプの電気エネルギーは1.32 MJ m²と、暖房時の12.34 MJ m²の11%程度である。また、2℃低下させる夜間冷房であれば、電気料金は月55円 m²程度であるため(表3-3)、バラ栽培においては夏季夜間冷房の使用が効果的である。

COP4.06の値は、1987年に神藤ら(1987a)が報告したCOPの2.0~2.8、1989年に佐々木(1989)が報告したCOPの2.4~3.2の値と比較しても大きな値になっており、ヒートポンプの性能も明らかに向上したと推測される。2008年の川嶋ら(2008)の報告では、本試験と同様のヒートポンプを使用しており、短期間で測定したCOPの値は3.58であるが、外気温が5~9℃程度の低温条件のため、やや低い値となったと思われる。

大山と古在(2008)は、施設園芸に高性能小型電気ヒートポンプの導入を検討しており、小型ヒートポンプではCOP5~6の高性能のヒートポンプが市販されており、これを施設園芸に導入することで、効率的暖房が可能であるとしている。園芸用のヒートポンプも今後も更なる性能の向上が期待できる。

ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用して使用するハイ

ブリッドシステムは、複数の暖房機器を同時に使用するため、その制御方法が重要となる。ランニングコストが安いヒートポンプを主体として使用し、暖房熱量が不足し始めたら、重油式温風暖房機を使用するのが、効果的な利用方法である(馬場, 2007; 野々下, 2009)。本試験で使用したハイブリッド制御盤は、暖房時にはヒートポンプを優先的に稼働させ、暖房設定温度よりも2℃以上低くなると、自動的に重油式温風暖房機が稼働し併用運転となる。川嶋ら(2008)も同様の制御で、ほぼ設定どおりになると報告しており、温風暖房機とヒートポンプを有効に使用するためには、温風暖房機が稼働してもヒートポンプが能力を落とさずに運転できることや、ヒートポンプを優先的に使用するなどの機能を持った専用の制御機器の利用が望ましい。

今回用いたヒートポンプの暖房能力は、床面積1000 m²のフェンロー型温室(温室表面積1770.9 m²)に表面積換算すると、49.2 W m²相当となる。このヒートポンプでは、最も外気温が低下した1月において、46%の暖房負担割合であった。外気温が高くなる4月以降には、88%以上の負担をしていた。ヒートポンプの過剰な設置は、電気料金の基本料金の負担増加となるため、磐田市における冬季の暖房設定温度18℃のバラ栽培においては、ヒートポンプの暖房能力49.2 W m²程度が適正な規模と判断した。

3) ハイブリッドシステムによる年間冷暖房費の比較

温度補正を含めたハイブリッド区の年間のA重油使用量は、対照区よりも62%削減でき、A重油の価格変動による影響が小さくなる。但し消費電力量は対照区の13倍になるので(表3-2)、電気料金の変動による影響を受けやすくなる。

試験実施期間におけるA重油の実勢価格65.8円 L⁻¹で冷暖房費を比較すると、ハイブリッド区において年間の冷暖房費が約24%削減できる(表3-3, 図3-6)。A重油価格は、原油の市場価格に大きく左右され変動する。一方電気料金は、急激な変動は比較的少ない。そこで、電気料金を同一と仮定し、A重油価格を変動した場合に、年間の冷暖房費がどのように変化するかを検討した(図3-8)。A重油価格が高くなると、ハイブリッド区も対照区も、年間冷暖房費は増加するが、ハイブリッド区は、その増加割合が少なくなる。

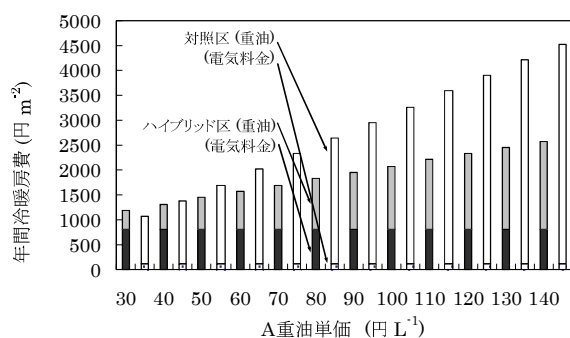


図 3-8 重油単価の違いによるハイブリッド区と対照区の年間冷暖房費の変化

A 重油価格変動時の年間暖房費削減率を算出すると、ヒートポンプや重油式温風暖房機の導入経費を含まない場合の比較では、A 重油価格が 37 円 L⁻¹ 以上で、ハイブリッド区における暖房費が対照区と比較して少なくなり、経費削減となることが明らかとなった(図 3-8)。

上記の結果は、電気料金を固定した場合の試算である。電気料金が改定され価格が高くなれば試算結果も大幅に変わる。電気料金(基本料金+従量料金)が、現行の 2 倍と仮定した場合には、重油価格が 78 円 L⁻¹ 以上でハイブリッド区が価格的に有利になる(図 3-9)。

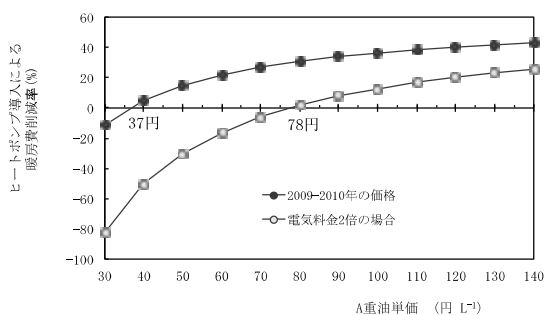


図 3-9 電気料金を 2 倍と仮定した場合の重油単価の違いによるハイブリッド区の対照区に対する年間冷暖房費削減率の変化

温室面積 1000 m² へのヒートポンプ導入経費を 2500000 円と仮定し、A 重油の価格変動に伴う経済性を検討した。電気料金を同一と仮定し、A 重油価格を変動させ、下記の式 Eq.(3-4)によりヒートポンプ導入金額から 10% の残存価格を減じた値を、ハイブリッドシステムによる暖房費の削減額で除して償却年数を試算した。ここでは、ヒートポンプの電気使用量の増加に伴う、受電設備等の増加は考慮していない。

$$X = (P - P/10)/D \quad \text{Eq. (3-4)}$$

X: ヒートポンプ償却年数, P: 導入価格(2500 円 m²), D: ヒー

トポンプによる年間暖房費削減額

A 重油価格 50 円 L⁻¹ では、2500 円 m² で導入したヒートポンプを償却するのに 8.9 年必要であった。ヒートポンプの法定耐用年数である 7 年を基準とすると、A 重油価格が 54 円 L⁻¹ 以上で年間の冷暖房費の削減額から、7 年での償却が可能となる(図 3-10)。

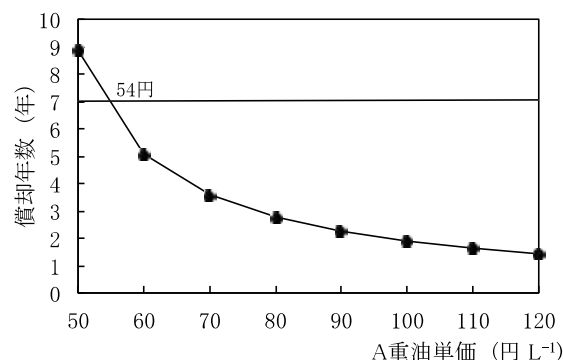


図 3-10 重油単価の違いによるヒートポンプ導入費の償却年数の変化

以上の結果から、バラ栽培温室において、慣行の重油式温風暖房機に加え、49.2 W m² の暖房能力を持つヒートポンプを設置したハイブリッドシステムで、冬期の夜間暖房設定温度 18℃ (10~4 月の 18~8 時までの温室内気温平均値は 19.6℃)、夏季の夜間冷房設定温度 20℃ (8, 9 月の 18~8 時までの温室内気温平均値は 22.4℃) で使用した場合、ヒートポンプや重油式温風暖房機の導入経費を含まず、電気料金を固定した場合の比較では、A 重油価格が 37 円 L⁻¹ 以上で、ハイブリッド区における暖房費が少なくなった。仮に購入価格 2500 円 m² でヒートポンプを導入した場合は、A 重油価格が 54 円 L⁻¹ 以上で法定耐用年数である 7 年以内での減価償却が可能となることが明らかとなった。

また、投入エネルギーは、ヒートポンプを併用したハイブリッド区は、対照区と比較して 46% 削減でき(表 3-2, 図 3-5)、2009~2010 年時の重油価格、電気料金の比較では、ヒートポンプによる夏季夜間冷房を加えても、冷暖房費が約 24% 削減できた。年間 CO₂ 排出量もハイブリッド区は、対照区と比較して 39% 削減できるので、今後の施設園芸用の暖房装置としての普及が期待できることが明らかとなった。

第IV章 ハイブリッドシステムのバラ栽培への応用（バラの収量品質）

第III章ではヒートポンプと重油式温風暖房機を併用したハイブリッド区は、対照区と比較して、投入エネルギーは46%削減でき、試験期間中の2009～2010年の電気料金、A重油実勢価格65.8円L⁻¹で冷暖房費が約24%削減できることを明らかにした。ハイブリッドシステムは、従来の重油式温風暖房機と吐出温度や風量などが異なる。ハイブリッドシステムの利用が、バラの収量及び品質に与える影響を、年間を通して慣行の重油式温風暖房機による環境制御と比較し検討する必要がある。

また、ヒートポンプは、暖房だけでなく夏季の夜間冷房や除湿にも利用できるメリットがある(小国, 1982, 林ら, 1983b)。森口ら(1990)は、バラ栽培で夏季高温期における夜間冷房と根圏冷却の効果を検討し、夜間冷房により切花本数が増加すると報告している。PlaautとZieslin(1979)は、数品種のバラを用いてパッドアンドファン処理による日中の温度低下の効果を調査し、切花重が増加し花色もよくなり品質も向上したと報告している。高温期における日中および夜間の温度低下は、バラの収量品質に大きく影響を与えている。ヒートポンプを利用した夏季の夜間冷房が、バラの収量品質および経営に与える影響を検討する必要がある。しかしながら、ハイブリッドシステムがバラ栽培の収量、品質、温室の環境条件、および経営にどのような影響を与えるかを、1年間を通して詳細に報告されたものはない。

本章では、空気熱源式ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用したハイブリッドシステムによる、冬季の暖房と夏季夜間冷房を組み合わせた温度制御と、慣行の重油式温風暖房機による暖房のみの場合において、1年間の長期間にわたりバラの収量、および切花長による階級別発生率などの品質、販売額、冷暖房経費を含めて、バラ栽培経営に与える効果を検討した。

材料および方法

1) 試験区の設置方法

ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用する「ハイブリッド区」と、重油式温風暖房機のみ「対照区」を、静岡県農林技術研究所内のフェンロー型温室の中央部を、ガラス戸で分割することで設定した(図3-1、写真4-1)。各処理区には循環扇を設置し、常時運転した(写真2-2、図2-2)。ここでは、冷暖房機器が稼働する18時から翌日の8時までを夜間とし、8時から18時までを日中とした。冷暖房機器の作動していない日

中は、中央部のガラス戸を開放し、冷暖房装置の稼働する夜間の時間帯のみ、中央部のガラス戸で仕切った。なお、日中の時間帯でも、天候等の影響により暖房機が稼働するときには、中央部のガラス戸を閉鎖した。両区とも、同一形状の温室(床面積259.2m²(間口9.6m×奥行27m)、軒高4.8m)を用いた。温室の表面積は、暖房時には両区とも暖房を行っているため、熱の移動は無いものと仮定し、対照区と中央部の仕切りの表面積は含めず、504.4m²として評価した。ハイブリッド区の夜間冷房時における表面積は、処理区中央部の仕切り部分の面積を加えた634.0m²を用い評価した。

2) ヒートポンプの能力と温度設定

ハイブリッド区の空気熱源式ヒートポンプ(FDUP1402HM改、三菱重工空調システム(株))は、電気駆動で定格暖房能力14kWのものを使用した(写真2-1)。ヒートポンプの暖房能力を、床面積1000m²のフェンロー型温室(温室表面積1770.9m²)に表面積換算すると、49.2W/m²相当となる。ハイブリッド区の重油式温風暖房機(HK-2027、ネボン(株))は、暖房能力56.8kW(熱出力64.6kW、効率88.0%)のものを利用した。同様に床面積1000m²のフェンロー型温室に表面積換算すると、暖房能力は199.4W/m²相当となる。ヒートポンプの定格冷房能力は12.5kWであり、床面積1000m²のフェンロー型温室へ表面積換算すると、34.9W/m²相当となる。

対照区の暖房には、重油式温風暖房機(HK-1522、ネボン(株))を使用した(暖房能力38.0kW、熱出力44.2kW、効率86.0%)。床面積1000m²のフェンロー型温室へ表面積換算すると、暖房能力は133.4W/m²相当となる。

温室の暖房温度設定は、ハイブリッド制御盤(NT-600、ネボン(株))を用いて行った(写真2-3)。設定温度は、時間帯別に18～22時は22℃、22～6時は18℃、6～18時は20℃とした。ヒートポンプによる夜間冷房は、2009年8月1日～9月15日に行った。夜間冷房の設定温度は、21～0時が22℃、0～7時が20℃とした。夜間暖房時は、ハイブリッド区、対照区とも温室上部を2層カーテン(上部：アルミカーテンPH-66、下部：不織布カーテンLS-10S、ともに(株)誠和)、温室側面を1層カーテン(不織布)で被覆し、夜間冷房時は、ハイブリッド区のみ温室上部2層、側面1層カーテンで覆った。夜間冷房時の対照区は、20℃に設定した天窓、側窓の開閉のみで温度制御した。暖房時における対照区の暖房設定温度は、ハイブリッド区と同様の設定とした。

試験期間は、2009年6月1日から2010年5月31日までとした。



写真4-1 試験に用いたフェンロー型温室

3) 温湿度の計測

温湿度をカードロガー(MR6662, (株)チノー)および温湿度センサ(MR9202, (株)チノー)を用い、10分間隔で測定した。温湿度センサを、風速約 3 m s^{-1} で常時通風している筒状容器内に入れ、各処理区9点 1.5 m の高さで測定した。

4) バラの栽培概要、収量品質調査および統計分析

2005年4月20日に 5.692 株 m^{-2} の栽植密度で、バラの品種‘ローテローゼ’(*Rosa hybrida* L. ‘Asami Red’, 写真4-2)を定植した。



写真4-2 バラ‘ローテローゼ’ *Rosa hybrida* L. ‘Asami Red’。

栽培方式は、底面給液式プランター、ポリフェノール培地(MTポット、アクアフォーム、ともに(株)プランツ)を用いた養液栽培で(図4-1、写真4-3)、肥料と水を交互に与える給液法を用いた。底面給液式プランターは、外部容器と培地を充填する内部容器の、2重構造となっている(図4-1)。外部容器は容器底から 15 cm の位置に排水口がついており、外部容器下部は、水が貯まる構造となっているが、過剰な養液は排出される。内部容器の一部は、外部容器の底辺まで達しており、充填す

るポリフェノール培地は貯留水に常に接しており、養液の供給元となっている。

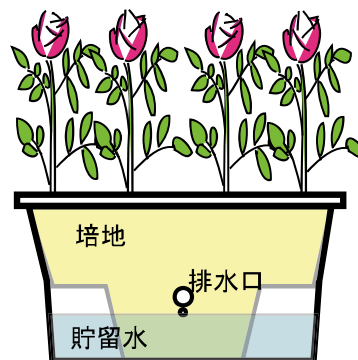


図4-1 栽培に使用した底面給液式プランターの構造



写真4-3 プランターにポリフェノール培地を充填した状態の栽培装置

培養液処方、 $\text{NO}_3\text{-N}$: 11.6, P: 3.5, K: 5.7, Ca: 6.6, Mg: 2.0 (me L^{-1})、微量元素は Fe: 3, Mn: 0.5, B: 0.3, Cu: 0.04, Zn: 0.1, Mo: 0.02 (ppm) を用い、アーチング栽培した。随時発生するシュートをバラの切り前4(フローリスト編集部, 1994)で収穫し、一斉折り曲げは行わなかった。

収穫した切花は、切花長、切花重量、花らい長、階級別切花本数を調査した。バラ切花の階級は、切花長で分類されるため、階級別切花本数は切花長 30 cm 以上 10 cm 間隔で分別した。切花長 30 cm 以下と、中央部茎径 4.5 mm 以下の切花は、出荷規格外品とした。

ハイブリッド区と、対照区におけるバラの切花長、切花重量、花らい長、切り花本数の調査は、1区10株3反復で行った。階級別の切花本数は、サンプル数を多くするため3反復の合計で、1区30株反復なしで調査した。

実験の統計分析は、同一期間内での異なる区で、ANOVAで行って有意差を検定した。

5) バラの販売価格のシミュレーション

市場価格は、東京都中央卸売市場の市場統計情報により、試験期間中のバラの価格を参考に求めた(東京都中央卸売市場、<http://www.shijou-tokei.metro.tokyo.jp/index.html>, 2012

年9月30日参照)。日本においては、統一されたバラの階級はなく、それぞれの産地で独自に階級を決定している。一般的にバラの階級は、切花長により分類される場合が多い。本試験の階級別単価は、東京都中央卸売市場における月別平均価格に、各階級の係数を乗じて階級別の単価とした。階級別の係数は、80 cm 以上が1、70 cm 以上80 cm 未満が0.8、60 cm 以上70 cm 未満が0.6、50 cm 以上60 cm 未満が0.4、40 cm 以上50 cm 未満が0.2、30 cm 以上40 cm 未満が0.1とした。また、規格外品の単価は、0円とした。

6) 消費電力量、重油使用量の計測と費用の算出

使用重油量および消費電力量から換算した冷暖房費は、温室面積1000 m²、温室表面積1770.9 m²のフェンロー型温室に表面積の比率で換算した。ヒートポンプおよび重油式温風暖房機の消費電力は、個々に交流電力モニタ(富士電機システムズ(株), PPMCFBR2-M)で測定した。電気料金は、中部電力(株)の低圧季節別時間帯別電力料金(2010年：夏季日中(7～23時 7～9月) 12.95円 kW⁻¹ h⁻¹、その他の季節 11.77円 kW⁻¹ h⁻¹、夜間(23～7時) 9.33円 kW⁻¹ h⁻¹、基本料金月額1037.4円 kW⁻¹を12ヶ月分加算)で試算した。電気料金の基本料金は、温室面積1000 m²あたり151 kWで契約したとして試算した。

年間の暖房費の試算のためのA重油価格には、2009年6

月から2010年5月の小型ローリーA重油全国平均価格(経済産業省資源エネルギー庁、石油製品価格調査、<http://www.echo.meti.go.jp/info/statistics/sekiyukakaku/sekiyukakaku3.htm>, 2012年8月16日参照)の平均値65.8円 L⁻¹を使用した。

結 果

1) ハイブリッド区と対照区の温室内環境条件

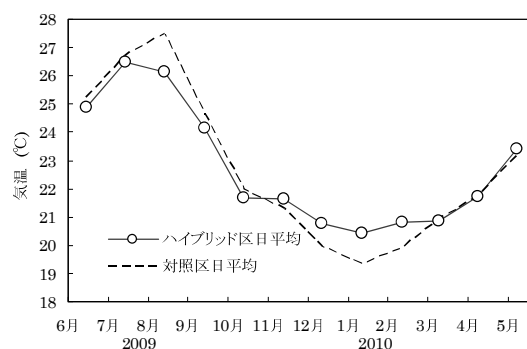


図4-2 ハイブリッド区と対照区の月別日平均気温

全時間帯の平均気温の月別推移では、夜間冷房を行った8月でハイブリッド区が1.3°C低かった(表4-1, 図4-2)。ハイブリッド区の夜間冷房は8月1日から9月15日の間であり、9

表4-1 ハイブリッド区と対照区の月別平均の日中気温、夜間気温、日中相対湿度、夜間相対湿度、日中絶対湿度、夜間絶対湿度²⁾

	処理区	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	平均
日平均気温 (°C)	ハイブリッド区	24.9	26.5	26.2	24.1	21.7	21.6	20.8	20.4	20.8	20.9	21.7	23.4	22.7
	対照区	25.2	26.7	27.5	24.6	22.0	21.3	19.9	19.3	19.9	20.9	21.7	23.2	22.7
	戸外	22.7	26.1	27.4	24.2	18.8	14.3	9.2	6.2	8.0	10.6	13.8	18.9	16.7
日中平均気温 ¹⁾ (°C)	ハイブリッド区	28.1	29.1	30.5	27.5	24.3	23.7	22.8	22.6	23.5	23.3	24.9	27.0	25.6
	対照区	28.1	29.6	30.8	27.9	24.7	23.9	22.5	22.3	22.7	23.6	24.2	26.5	25.6
	戸外	24.9	27.7	29.9	26.9	21.6	16.9	11.6	8.6	10.4	12.8	16.1	21.7	19.1
夜間平均気温 ¹⁾ (°C)	ハイブリッド区	22.7	24.4	23.1	21.7	19.8	20.2	19.3	18.8	18.9	19.1	19.5	20.9	20.7
	対照区	23.1	24.8	25.3	22.2	20.0	19.4	18.0	17.2	17.9	18.9	19.6	20.5	20.6
	戸外	21.1	25.0	25.6	22.2	16.8	12.4	7.6	4.5	6.4	9.1	12.2	16.9	15.0
日平均湿度 (%)	ハイブリッド区	79.7	83.7	76.2	78.2	78.3	74.9	66.8	58.8	64.7	67.2	72.0	73.6	72.9
	対照区	81.3	85.5	80.7	79.2	79.5	78.6	72.9	69.5	71.2	69.8	71.4	73.3	76.1
	戸外	79.5	84.9	75.2	70.6	73.1	73.4	66.5	62.0	74.3	71.2	71.4	71.7	72.8
日中平均湿度 (%)	ハイブリッド区	68.0	77.5	66.6	64.1	66.7	72.1	68.5	62.3	63.2	63.2	63.1	59.2	66.2
	対照区	68.4	74.9	64.9	61.7	66.8	74.2	74.0	71.4	71.9	67.1	64.8	57.9	68.2
	戸外	70.7	78.5	64.4	59.4	62.9	64.0	58.1	53.1	65.2	62.6	62.9	61.7	63.6
夜間平均湿度 (%)	ハイブリッド区	86.4	89.2	83.1	88.3	86.6	76.9	65.7	56.3	65.7	70.1	78.4	83.9	77.5
	対照区	89.9	91.2	90.4	90.8	88.1	82.0	73.2	69.5	71.9	72.4	77.1	84.2	81.7
	戸外	85.8	89.5	83.0	78.6	80.4	80.1	72.5	68.3	80.7	77.4	77.4	78.7	79.4
日中平均絶対湿度 (g kgDA ⁻¹)	ハイブリッド区	18.5	22.2	20.7	16.8	14.5	15.3	13.9	12.5	13.2	12.9	13.7	14.9	15.8
	対照区	18.5	22.0	20.4	16.5	14.8	15.9	14.8	14.1	14.5	14.1	13.9	14.2	16.1
	戸外	16.1	20.8	19.3	15.0	11.7	9.3	6.2	4.5	6.5	7.1	8.5	11.7	11.4
夜間平均絶対湿度 (g kgDA ⁻¹)	ハイブリッド区	17.5	19.9	17.3	16.9	14.8	13.4	10.9	9.1	10.7	11.5	12.9	15.3	14.2
	対照区	18.6	20.7	21.2	18.2	15.4	13.7	11.3	10.2	11.1	11.8	13.1	15.0	15.0
	戸外	15.9	20.5	19.8	15.5	11.6	8.9	6.0	4.6	6.3	7.2	8.6	11.6	11.4
日中飽差平均 (kPa)	ハイブリッド区	0.39	0.34	0.49	0.31	0.32	0.55	0.78	0.96	0.75	0.68	0.54	0.41	0.54
	対照区	0.30	0.29	0.33	0.26	0.29	0.41	0.56	0.60	0.58	0.60	0.53	0.40	0.43
	戸外	0.36	0.35	0.57	0.59	0.38	0.29	0.28	0.27	0.17	0.25	0.32	0.41	0.35
夜間平均飽差 (kPa)	ハイブリッド区	1.26	0.96	1.49	1.37	1.07	0.85	0.89	1.05	1.12	1.12	1.30	1.52	1.17
	対照区	1.24	1.12	1.60	1.50	1.09	0.80	0.74	0.80	0.81	1.02	1.15	1.53	1.12
	戸外	0.97	0.86	1.55	1.49	1.02	0.73	0.58	0.55	0.45	0.58	0.73	1.04	0.88

²⁾ 測定は2009年6月から2020年5月に行った。

¹⁾ 日中は(8:00～18:00)、夜間は(18:00～8:00)

月の平均気温の差は 0.5°C であった。11月から2月までの対照区の平均気温は、熱量が不足ハイブリッド区より $0.3\sim 1.1^{\circ}\text{C}$ 低く推移した。年平均気温は、ハイブリッド区、対照区共に 22.7°C と同一であった。

ヒートポンプを稼働しない日中8～18時の時間帯の平均気温は、ハイブリッド区と対照区では大きな温度差は見られず、年平均気温も 25.6°C で同一であった(表4-1,図4-2)。

ヒートポンプの稼働時間帯である18～8時までの月別平均気温の推移では、夜間冷房を実施した8月のハイブリッド区で 23.1°C となり、対照区と比較して 2.2°C 低下し、冷房による気温低下が見られた。9月の夜間平均気温は、ハイブリッド区は 21.7°C で、対照区よりも 0.5°C 低く、8月と比較すると温度低下は小さかった。7～9月の対照区は、夜間も温室の窓がほぼ全開していたため、夜間の平均気温は、外気温とほぼ同様の温度であった。暖房期間の10月以降になると、対照区の夜間気温が低く推移した。最も温度差のあった2010年1月では、対照区の夜間の平均気温は 1.6°C ハイブリッド区のそれよりも低かった(表4-1,図3-2)。

ハイブリッド区と対照区の月別全時間帯の平均相対湿度は、ハイブリッド区がやや低い値であった(表4-1,図4-3)。

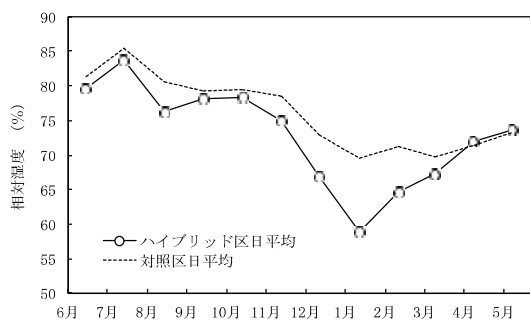


図4-3 ハイブリッド区と対照区の月別日平均相対湿度

暖房を開始した10月以降ハイブリッド区で相対湿度が低くなる傾向があり、試験区間の差が最も大きくなった1月は、対照区の相対湿度が 69.5% であったのに対して、ハイブリッド区では 58.8% であった。年間の夜間平均湿度は、ハイブリッド区で 72.9% 、対照区で 76.1% とハイブリッド区で低かった。

月別の日中の相対湿度は、5～11月はほぼ同様に推移したが、12月以降はハイブリッド区で低い値となった(表4-1,図3-3)。夜間の相対湿度は、年間を通じてハイブリッド区が低く推移し、特に夜間冷房を実施した8～9月は低く、8月の対照区の夜間の相対湿度が 90.4% であったのに対し、ハイブリッド区の相対湿度は、ヒートポンプの冷房による除湿効果のた

め 83.1% であった。12～3月の暖房期間の夜間の相対湿度は、ハイブリッド区が対照区よりも低かったが、夜間の暖房温度がハイブリッド区で高かったことが要因として考えられる(表4-1,図3-2)。

日中の温室内の絶対湿度は、両区とも年間を通じて外気よりも高い値であった(表4-1,図4-4)。

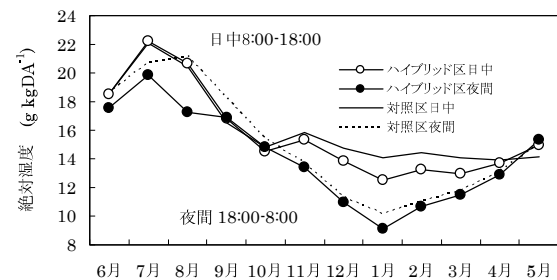


図4-4 ハイブリッド区と対照区の日中(8時～18時)と夜間(18時～8時)の月別平均絶対湿度

日中の絶対湿度は、暖房時期にハイブリッド区で乾燥する傾向が見られ、最も差があった1月では絶対湿度は 1.6 g kg^{-1} ハイブリッド区のほうが低かった。また、夜間の絶対湿度は、夜間冷房期間中の8月と、暖房期間中の1月でハイブリッド区が低い傾向であった。8月の対照区の夜間絶対湿度は 21.2 g kg^{-1} であったのに対し、ハイブリッド区の絶対湿度は、 17.3 g kg^{-1} と低く、夜間冷房による除湿の効果がみられた。

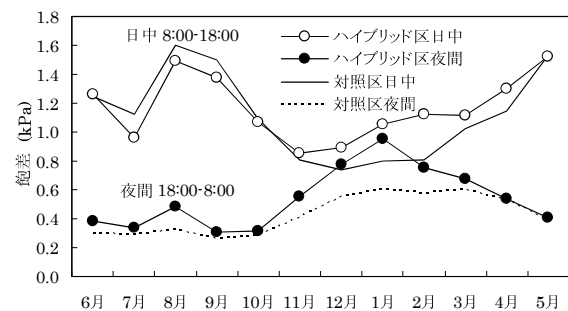


図4-5 ハイブリッド区と対照区の日中(8時～18時)と夜間(18時～8時)の月別平均飽差

気温と相対湿度から算出した飽差の月別推移は、日中でも夜間でもハイブリッド区でやや高い値であった(表4-1)。夜間冷房を行っている8月と、暖房による温度差、湿度差が大きかった11月から2月において、夜間のハイブリッド区の飽差が対照区と比較して著しく高かった(表4-1,図4-5)。

1) ハイブリッド区と対照区でのバラの収量および品質

表4-2 ハイブリッド区と対照区におけるバラ'ローテローゼ'(Rosa hybrida L. 'Asami Red')の月別収量および品質。

		月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	年間
切花本数 (本 株 ⁻¹)	ハイブリッド区 ^z	2.1	2.1	1.9	2.5	2.2	0.6	1.5	0.9	0.8	1.6	0.6	2.4	19.2	
	対照区	2.2	2.3	1.9	1.5	2.0	1.0	1.0	0.9	0.7	1.2	1.5	2.0	18.3	
	分散分析 ^y	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
切花総重量 (g 株 ⁻¹)	ハイブリッド区	83.6	73.8	58.2	81.0	80.3	29.1	59.9	35.8	39.8	71.3	27.3	72.8	712.7	
	対照区	88.0	70.2	48.3	42.7	67.7	37.7	42.4	37.6	26.8	51.6	62.7	67.6	643.2	
	分散分析	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	
平均切花重 (g)	ハイブリッド区	39.8	35.2	30.3	32.6	37.0	45.9	40.2	39.8	51.9	44.9	43.1	30.7	39.3	
	対照区	39.4	30.2	26.0	28.0	34.0	37.4	42.2	40.2	38.4	41.8	42.4	34.7	36.2	
	分散分析	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
平均切花長 (cm)	ハイブリッド区	73.4	72.6	69.1	66.7	75.7	81.5	82.0	76.2	85.8	78.7	76.4	59.7	74.8	
	対照区	77.2	69.3	62.3	61.4	75.3	77.0	85.9	80.4	75.5	79.6	80.8	73.5	74.9	
	分散分析	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.	**	n.s.	
平均花らい長 (cm)	ハイブリッド区	4.44	4.18	3.89	4.34	4.57	4.44	4.47	4.67	4.78	4.71	3.86	4.07	4.37	
	対照区	4.39	3.98	3.95	4.19	4.32	4.57	4.65	4.46	4.59	4.60	4.59	4.35	4.39	
	分散分析	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	*	n.s.	

^z 試験は2009年6月～2010年5月。ハイブリッド区は、8月1日から9月15日まで夜間冷房(18:00～8:00)を行った。

^y ** は1%で、*は0.5%水準で有意な差があることを示す。n.s.は有意差なし。

バラの月別収穫本数は、2009年9月においてハイブリッド区で、統計的に有意な差が多かった(表4-2)。その他の月については、統計的に有意な差は見られなかった。年間の切花収穫本数は、ハイブリッド区で1株あたり19.2本、対照区は1株あたり18.3本で、ハイブリッド区がやや上回ったが、統計的に有意な差ではなかった。

月別の切花総重量は、9月でのみハイブリッド区で有意な差が多かった。その他の月別切花総重量は、統計的に有意な差ではなかった。年間の切花総重量は、ハイブリッド区で1株あたり712.7g、対照区は1株あたり643.2gで、ハイブリッド区が統計的に有意な差が多かった。

月別の平均切花重量は、夜間冷房や暖房の違いによる影響が明確でなく、7月と2月でハイブリッド区の切花重量が重かった。年間の平均切花重量は、ハイブリッド区が1株あたり39.3gで、対照区の1株あたり36.2gと比較してやや大きな値であったが、統計的に有意な差ではなかった。

バラ切花の品質の指標となる切花長は、2月と5月において統計的に有意な差であった。しかし、2月ではハイブリッド区が長く、5月では対照区が長い結果となり、処理区による一定の傾向はなかった。年間の平均切花長は、ハイブリッド区が74.8cm、対照区が74.9cmと同等であった。

平均花らい長は4月と5月において対照区が有意な差が大きかった。年間の平均花らい長に、有意な差は見られなかった。

2009年6月1日の試験開始時点から、5日単位で区切って収穫本数の推移を見た。ハイブリッド区では6月から9月までは約35日間隔で収穫のピークがみられ、その後12月までは約45日間隔、1～2月までは約60日間隔、その後は5月までは約45日間隔でピークが現れた(図4-6)。対照区では、7～9月まではハイブリッド区と同様に、約35日間隔で収穫本数のピークが見られたが、9月の収穫の本数は少なく、収穫本数の

ピークがはっきりしない状態であった。10月以降の収穫本数のピークは、ハイブリッド区と対照区ではほぼ同様の傾向であ

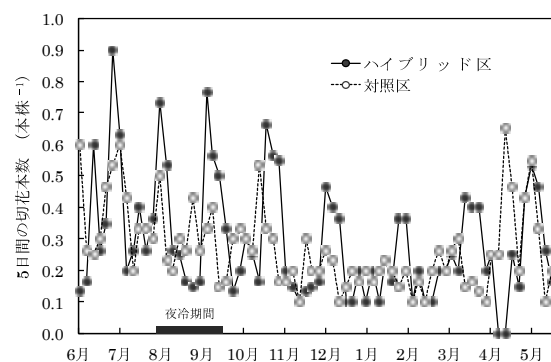


図4-6 ハイブリッド区と対照区で栽培したバラの年間切花本数の推移

った。1～2月の冬季においては、両処理区とも収穫本数が少ない傾向であった。4～5月では、対照区の収穫本数が多くなった。

図4-6の収穫本数の周期と、ヒートポンプ運転状況から判断して、ヒートポンプが収量品質に及ぼす影響を判断するために、6～7月を夜間冷房開始前期間、8～9月を夜間冷房期間、10～5月までを暖房期間とし、バラの収量・品質を調査した(表4-3)。夜間冷房開始前期間、夜間冷房期間、暖房期間のいずれの期間においても、収穫本数は両区で統計的に有意な差は見られなかった。

切花総重量は、夜間冷房開始前期間ではハイブリッド区と対照区で差は見られなかった。夜間冷房期間は、ハイブリッド区が1株あたり139.2gと対照区の1株あたり91.0gと比較して有意な差で重かった。暖房期間の切花総重量は、統計的に有意な差ではなかった。年間の切花総重量は、ハイブリッド区で有意な差で重かった。

表4-3 ハイブリッド区と対照区の期間別バラ (*Rosa hybrida* L. 'Asami Red') の収量・品質と期間別平均気温.

処理区	夜間冷房開始前期間 (6~7月)	夜間冷房期間 ^z (8~9月)	暖房期間 (10~5月)	年間
切花本数 (本 株 ⁻¹)	4.2 4.6 分散分析 ^y n.s.	4.4 3.4 n.s.	10.6 10.4 n.s.	19.2 18.3 n.s.
切花総重量 (g 株 ⁻¹)	157.4 158.2 分散分析 n.s.	139.2 91.0 *	416.1 394.0 n.s.	712.7 643.2 *
平均切り花重 (g)	37.4 34.7 分散分析 *	31.6 27.0 *	39.5 37.9 n.s.	39.3 36.2 n.s.
平均切り花長 (cm)	73.0 73.2 分散分析 n.s.	67.8 62.1 *	74.7 77.9 n.s.	74.8 74.9 n.s.
平均花らい長 (cm)	4.32 4.18 分散分析 *	4.15 4.06 n.s.	4.44 4.49 n.s.	4.37 4.39 n.s.
日中平均気温 ^x (°C)	28.6 28.8	29.0 29.3	24.0 23.8	25.6 25.6
夜間平均気温 ^x (°C)	23.6 23.9	22.4 23.8	19.6 18.9	20.7 20.6

^z 試験は2009年6月から2010年5月. ハイブリッド区は、8月1日から9月15日まで夜間冷房 (18:00から8:00)を行った.^y ** は1%で、*は0.5%水準で有意な差があることを示す. n.s.は有意差なし.^x 日中は8:00から18:00,夜間は18:00から8:00の間の平均値.表4-4 ハイブリッド区と対照区のバラ (*Rosa hybrida* L. 'Asami Red') の月別階級別発生率 (%)^z.

処理区	切り花長 <i>L</i> (cm)	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	年間
ハイブリッド区	80 ≤ <i>L</i>	19.0	19.0	10.5	6.7	32.3	63.2	53.3	25.9	73.9	43.8	31.6	1.4	25.0
	70 ≤ <i>L</i> < 80	44.4	46.0	28.1	25.3	46.2	26.3	37.8	48.1	17.4	33.3	36.8	15.5	33.9
	60 ≤ <i>L</i> < 70	23.8	15.9	33.3	37.3	7.7	0.0	4.4	22.2	4.3	16.7	15.8	35.2	21.2
	50 ≤ <i>L</i> < 60	3.2	3.2	7.0	12.0	1.5	0.0	0.0	3.7	0.0	4.2	10.5	23.9	7.0
	40 ≤ <i>L</i> < 50	1.6	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.5	3.1
	30 ≤ <i>L</i> < 40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.2
	規格外 ^y	7.9	15.9	21.1	18.7	10.8	10.5	4.4	0.0	4.3	2.1	5.3	0.0	9.6
切り花総本数 ^x		11.95	11.95	10.81	14.23	12.33	3.60	8.54	5.12	4.36	9.11	3.60	13.47	109.10
対照区	80 ≤ <i>L</i>	40.3	15.7	3.6	2.2	33.3	30.0	70.0	39.3	18.2	43.2	51.1	21.7	28.7
	70 ≤ <i>L</i> < 80	31.3	27.1	16.1	20.0	25.0	33.3	16.7	46.4	54.5	43.2	40.0	40.0	31.1
	60 ≤ <i>L</i> < 70	14.9	20.0	25.0	28.9	15.0	6.7	3.3	0.0	18.2	13.5	8.9	26.7	16.7
	50 ≤ <i>L</i> < 60	1.5	12.9	12.5	17.8	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	5.5
	40 ≤ <i>L</i> < 50	0.0	1.4	3.6	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
	30 ≤ <i>L</i> < 40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	規格外	11.9	22.9	39.3	24.4	25.0	30.0	10.0	14.3	9.1	0.0	0.0	5.0	16.9
切り花総本数		12.71	13.28	10.63	8.54	11.38	5.69	5.69	5.31	4.17	7.02	8.54	11.38	104.35
市場単価 ^w (円/本)		51.6	49.6	50.3	67.3	69.4	85.1	80.7	75.1	83.8	95.2	70.7	69.3	70.7

^z 試験は2009年6月から2010年5月. ハイブリッド区は、8月1日から9月15日まで夜間冷房 (18:00から8:00)を行った.^y 規格外は茎径5 mm以下または切り花長が30 cm以下のバラ.^x 切り花本数は試験データから1 m²当りに換算した.^w バラの市場単価は試験実施時における東京都中央卸売市場の値.

平均切花重量の期間別推移は、夜間冷房開始前期間、夜間冷房期間ともにハイブリッド区が有意な差で大きかったが、暖房期間では両区に差は無かった.

平均切り花長は、夜間冷房期間でのみハイブリッド区で有意な差で長かった.

平均花らい長の期間別推移は、夜間冷房開始前期間のみ、ハイブリッド区が長かった. 各期間における両区の日中の平均気温差は0.3°C 以内で、ほぼ同様であった(表4-3). 一方夜間の平均気温は、夜間冷房開始前期間の差は0.3°C 程度であったのに対して、冷房期間は1.4°C ハイブリッド区が低く、夜間冷房の効果が現れていた. 暖房期間における夜間の平均

気温は、対照区が0.7°C 低かった.

切花の年間の階級別発生率は、ハイブリッド区と対照区ではほぼ同様の傾向であった(表4-4). 月別の階級別発生率の違いでは、6月には対照区で80 cm 以上の切花が多かった. 8月と9月はハイブリッド区において70 cm 以上の上位2階級の発生率が高かった. 8月の規格外品の発生率は、対照区はハイブリッド区の倍以上であった. 2010年3月以降では、対照区で70 cm 以上の切花発生率が高くなった. いずれの処理区でも、40 cm 以下の階級の切花本数は少なかった.

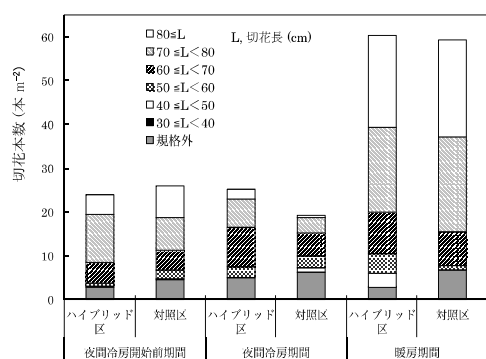


図4-7 ハイブリッド区と対照区で栽培したバラの期間別階級別切花本数

切花の階級別の収穫本数を冷暖房期間別にまとめると(図4-7)、夜間冷房開始前の切花の階級別収穫本数は、対照区で80 cm以上の階級が多いものの、70 cm以上の収穫本数は、ハイブリッド区が15.368本/m²であるのに対して、対照区が14.799本/m²と上位2階級の収穫本数はほぼ同様であった。夜間冷房期間は、両区とも80 cm以上の切花本数が極端に少なくなった。対照区と比較してハイブリッド区で上位階級の収穫本数が多く、60 cm以上の上位3階級ではハイブリッド区が17.645本/m²と、対照区の9.107本/m²の倍程度の本数であった。また、茎が細いなどの規格外品の発生本数は、対照区で多かった。

10月から5月までの暖房期間における70 cm以上の上位2階級の収穫本数は、ハイブリッド区で40.233本/m²と、対照区の43.639本/m²よりもやや少なかった。出荷規格外の本数は、ハイブリッド区が2.656本/m²、対照区が6.830本/m²と、対照区で多かった。

1) ハイブリッド区と対照区におけるバラの販売価格のシミュレーション

試験期間中における東京都中央卸売市場のバラの平均単価(表4-4)に、階級別の係数を乗じて求めたバラの販売単価と、各階級別の収穫本数(表4-4)から、両処理区の生産額を求めた(表4-5)。夜間冷房開始前は、ハイブリッド区のバラの生産額は約830円/m²で、対照区の約850円/m²と大きな差はなかった。夜間冷房期間の生産額は、ハイブリッド区が約820円/m²であるのに対して、対照区では約450円/m²と少なかった。暖房期間における生産額は、ハイブリッド区で約3490円/m²、対照区で約3420円/m²と大きな差はなかった。1年間の生産額は、ハイブリッド区が5141円/m²、対照区は4726円/m²と、ハイブリッド区で約415円/m²粗収益が増加した。収益増加の90%が、夜間冷房期間の販売額の増加であった。

2) 冷暖房コストの比較

表4-5 ハイブリッド区と対照区のバラ(*Rosa hybrida* L. 'Asami Red')の月別売上高²(単位:円/m²)

処理区	切り花長 L (cm)	夜間冷房開始前期間 (6~7月)	夜間冷房期間 ² (8~9月)	暖房期間 (10~5月)	年間
ハイブリッド区	80 ≤ L	230.5	121.1	1680.8	2032.4
	70 ≤ L < 80	437.7	316.3	1209.8	1963.8
	60 ≤ L < 70	144.6	323.3	426.8	894.7
	50 ≤ L < 60	15.4	61.2	125.5	202.1
	40 ≤ L < 50	2.0	0.0	44.7	46.6
	30 ≤ L < 40	0.0	0.0	1.3	1.3
	規格外 ³	0.0	0.0	0.0	0.0
	合計金額	830.1	822.0	3488.9	5141.0
対照区	80 ≤ L	367.8	31.9	1719.0	2118.7
	70 ≤ L < 80	307.6	160.7	1326.1	1794.3
	60 ≤ L < 70	137.8	179.8	350.4	668.0
	50 ≤ L < 60	37.8	67.6	26.3	131.7
	40 ≤ L < 50	1.9	11.5	0.0	13.4
	30 ≤ L < 40	0.0	0.0	0.0	0.0
	規格外	0.0	0.0	0.0	0.0
	合計金額	852.9	451.4	3421.8	4726.1

² 市場単価は東京都中央卸売市場のデータを使用し、階級別に以下の係数をかけて推測した。

切り花長80 cm以上1.0, 70 cm以上80 cm未満0.8, 60 cm以上70 cm未満0.6, 50 cm以上60 cm未満0.4, 40 cm以上50 cm未満0.2, 30 cm以上40 cm未満0.1。

³ 試験は2009年6月～2010年5月。ハイブリッド区は、8月1日から9月15日まで夜間冷房(18:00～8:00)を行った。

⁴ 規格外は茎径5 mm以下または切り花長が30 cm以下のバラ。

第三章でバラ栽培温室における年間冷暖房用電力量とA重油使用量から、冷暖房コストを算出し比較した(表3-3)。

A重油価格は、2009年6月～2010年5月までの試験期間中における、小型ローリーA重油全国平均価格65.8円/L¹を用いた。年間の冷暖房費は、対照区が2162円/m²であり、ハイブリッド区は1645円/m²で、約24%(517円/m²)の暖房費が削減された。8～9月の夜間冷房期間の電気料金は、ハイブリッド区はヒートポンプによる冷房のため84円/m²となり、対照区の8.2円/m²と比較して75.8円/m²多くなった。

温室面積1000 m²へのヒートポンプ導入経費を、2500000円と仮定し、A重油の価格変動に伴う経済性を検討した。電気料金を同一と仮定し、A重油価格を変動させ、下記の式Eq.(4-1)によりヒートポンプ導入金額から10%の残存価格を減じた値を、ハイブリッドシステムによる年間の暖房費削減額Dに夜間冷房による生産額の増加Iを加えた値で除して償却年数を試算した。ここでは、ヒートポンプの電気使用量の増加に伴う、受電設備費等の増加は考慮していない。

$$X = (P - P10) / (D + I) \quad \text{Eq. (4-1)}$$

X ヒートポンプ償却年数(年), P 導入価格(2500円/m²), D ヒートポンプによる年間暖房費削減額(円/年¹), I ヒートポンプの夜間冷房による生産額の増加(円/年¹)

夜間冷房による生産額の増加が無いと仮定すると、ヒートポンプの法定耐用年数である7年間で償却するためには、A重油価格が54円/L¹以上の条件でヒートポンプの導入価格が償却できる(図4-8)。これに夜間冷房による年間生産額の増加効果を加えると、A重油価格が32円/L¹以上の条件でヒートポンプの導入価格が償却できる。なお、本試験では、バラの増収による生産資材の増加や、人件費の負担増などは加味していない。

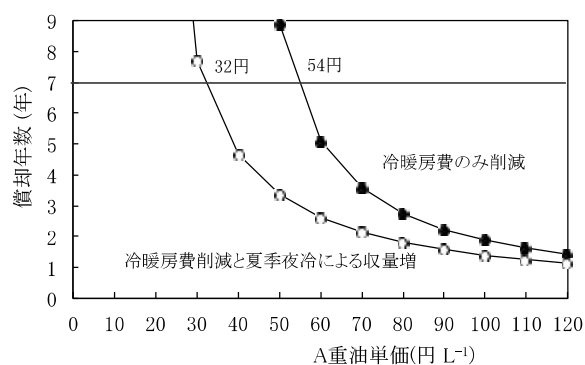


図4-8 重油単価とヒートポンプ導入費の償却年数の変化

考 察

1) ヒートポンプによる冷暖房が環境条件に及ぼす影響について

2009年6～2010年5月の試験期間における8～18時の平均気温は、ハイブリッド区と対照区は中央部の仕切りガラスを開放しているため、ほぼ同様の値であり、試験区の日中の温度条件は同一であると判断した。

18～8時までの夜間に温室の仕切りガラスを区切って設定した処理区では、8月1日から9月15日までの夜間冷房の実施により、8月と9月の平均気温が低下しており、ヒートポンプによる夜間冷房の効果が現れていた。特に期間を通して夜間冷房を稼働した8月のハイブリッド区の夜間平均気温は23.1℃で、対照区の25.3℃と比較して2.2℃低下した。夜間における相対湿度は処理区による差があり、8～9月の相対湿度は夜間冷房により低下し除湿の効果が見られた。夜間冷房による温室内の除湿の影響は、8月の平均値で絶対湿度の低下、飽差の増加として現れていた。

相対湿度は、11月以降対照区で高くなる傾向がみられた。対照区の暖房機の能力が、ハイブリッド区よりも低かったために、温室内気温が設定値まで上がらず、平均夜温が低下したのが要因の一つと考えられた。

2) ヒートポンプによる夜間冷房がバラの収量・品質に及ぼす影響について

今回の年間収量は、ハイブリッド区で19.2本/株¹、対照区で18.3本/株¹であった(表4-3)。梶原と勝谷(2003)は、'ローテローゼ'のロックウールアーチング栽培で年間収量は20～28本/株¹の報告をしており、他のバラ栽培収量と比較しても問題ない値である。

ヒートポンプが収量品質に及ぼす影響を判断するために、6～7月を夜間冷房開始前期間、8～9月を夜間冷房期間、10～5月までを暖房期間とし収量品質に及ぼす影響を調査した(表4-3)。各期間の区切りの時期である7月末と9月末は、いずれも収穫本数が減少した時期であり、ヒートポンプによる夜

間冷房や、暖房の効果を確認するのに適した時期と判断した(図4-6)。夜間冷房期間においては、ハイブリッド区では収穫本数のピークがはっきりしていたが、対照区は収穫本数が少なかった(図4-6)。ハイブリッド区では8月上旬から9月上旬までの収穫最盛期の間隔は約35日であり、その次のピークの10月中旬までは約45日間であった。対照区の収穫本数は、8～10月において著しく少なくなり、収穫本数のピークも分散した。

ハイブリッド区では、夜間冷房期からの収穫ピークの間隔は、対照区と比較すると間隔が長くなり、到花日数が増加した。森口ら(1990)も'カールレッド'を用いた夜間冷房で、到花日数が長くなることを報告しており、同様の影響が現れたと思われる。8月と9月の月別平均気温の変化では、日中気温に比較して夜間気温で大きな差があるため(表4-1)、対照区における夜間冷房期間の収穫本数の低下は(図4-6)、夜間の高温が大きく影響していると推測された。

夜間冷房開始前期間の切花総重量は、ハイブリッド区と対照区で差はなかったが、夜間冷房期間の8～9月の2ヶ月間は、夜間冷房により切花総重量は有意な差で増加した(表4-3)。夜間冷房期間の収穫本数は差が見られず、平均切花重量と切花総重量で有意な差が見られたので、夜間冷房期間の収量増加は、切花の重量が増加したためといえる。また、平均切花長は、夜間冷房期間のみハイブリッドが有意な差で長く、夜間冷房による品質向上効果がみられた。

大川(1997)は、夜温は到花日数、茎長、切花重量、茎の太さ、茎の硬さ葉色などに影響を与え、高夜温は到花日数を短縮し、茎長は短くなり、茎は細くなり、切花重量は軽くなると記述している。Marcelis(1995)も、高温によりバラの葉数が少なくなると報告している。夏季の対照区は、8月の夜間平均気温が25.3℃の高温となったため、バラの品質・収量が低下したと推測される。

一方、Shinら(2001)は、バラ'カーディナル'の30℃から15℃の範囲の栽培では、温度が低下すると茎は太くなり、切花重は増加すると報告している。夏季高温期における夜間冷房は、夜間温度を低下させることができ、対照区のバラの品質向上、増収に効果があると推測した。

土壌水分量は、バラ切花の収量に大きく影響を受ける(寺田ら, 1997b)。今回の試験は、ポリフェノール培地による養液栽培で行っている。給液は余剰水が出るように制御しており、また2重構造を持つプランターのため(図4-1)、培地が水分不足になる状況にはならない。ハイブリッド区と対照区の収量の差は、培地の水分状態の差ではない。

暖房期間の夜間の気温は、対照区で気温が低く推移し、最も温度差のあった2010年1月では、夜間平均気温は、1.6℃ハイブリッド区で高かった(表4-1)。暖房期間の月別の収量の比

較では、切花本数および切花総重量に、統計的に有意な差はなかった(表4-2)。また、10月から5月までの暖房期間の、切花本数と切花総重量にも統計的に有意な差は見られず(表4-3)、暖房期間の対照区の夜間温度低下が切花の収量に与えた影響は小さいと判断した。

今回の夜間冷房の試験では、‘ローテローゼ’のみで試験を行っている。大川(1997)は、‘ソニア’、‘ブライダルピンク’、‘ピサ’などのバラの品種で、夜温の適温に違いがあるとしており、品種が異なれば夏季高温期において夜間冷房に対する反応が異なることも考えられる。しかし、森口ら(1990)は、‘カールレッド’を用いた夜間冷房でも、夏季の収穫本数が増加することを報告しており、夜間冷房の効果は‘ローテローゼ’に限られるものではない。

また、今回の試験ではバラの仕立て方法はアーチング栽培(Ohkawa and Suematsu, 1999)で行っているが、Doi ら(2009)は、アーチング栽培における折り曲げ枝の状態が収量に及ぼす影響を調査し、通常のアーチング栽培であれば折り曲げ枝数により収量は大きく変化しないことを報告している。このことから今回の試験結果は、アーチング栽培における折り曲げ枝の数に大きな影響は受けず、同様の結果であると推測される。

3) ヒートポンプによる冷暖房がバラ生産額に与える影響について

バラの切花の市場出荷では、一般的に切花長により階級が決定される。今回のバラの単価は、東京都中央卸売市場のバラの平均単価に、係数をかけて階級別単価を設定した。係数は切花長 80 cm 以上を 1 とし、それ以下は 10 cm 単位で 0.2 ずつ係数を減ずることで階級別の単価を設定した。Kim と Heinrich(2004)は、アメリカにおけるバラの単価は、切花長 40 cm から 80 cm の範囲においては、価格と切花長は直線回帰で表すことができることを報告しており、切花長別の係数の設定は、実際の価格の推定として有効であると思われる。但し、東京都中央卸売市場の平均価格を、最上位階級の価格として設定しているため、設定単価は実際の価格よりもやや低い値となる。市場価格は社会情勢や、需要と供給により大きく左右されるため、経済性を過剰に評価しすぎないためにも、今回の価格設定は適正水準であると思われる。

これらの販売単価を用いたシミュレーションの結果、夜間冷房期間の生産額は、ハイブリッド区が約 370 円 m^2 対照区よりも増加した(表4-5)。年間の生産額は、ハイブリッド区で 415 円 m^2 粗収益が増加したが、その増加の 90% が夜間冷房期間の販売額の増加であり、ヒートポンプによる夜間冷房の実施は、バラの生産額増加に役立つと思われた。

暖房期間の販売額は、67 円 m^2 ハイブリッド区が上回っただけであり(表4-5)、対照区における冬季の夜間温度の低下

は、バラの生産額に大きな影響を与えなかった。暖房期間における収穫本数や切花総重量で表される収量についても、統計的に有意な差は見られず、冬季の夜間温度の低下は、バラの生産額に大きな影響を与えなかったと思われた。

1年間の生産額は、ハイブリッド区が 5141 円 m^2 、対照区は 4726 円 m^2 と、ハイブリッド区で約 415 円 m^2 粗収益が増加し、ヒートポンプを用いたハイブリッドシステムのバラ栽培温室導入への有効性が示された(表4-5)。

4) バラ栽培におけるヒートポンプ導入の経済性

第三章で、ヒートポンプと重油式温風暖房期を用いたハイブリッドシステムと、慣行の重油式温風暖房機との年間の冷暖房費を比較した。その結果、年間の冷暖房費は対照区の 2162 円 m^2 に比較して、ハイブリッド区は 1645 円 m^2 で、約 24% (517 円 m^2) の暖房費が削減できることを明らかにした(表3-3)。

本試験結果から、夏季にヒートポンプを用いて、バラ栽培で夜間冷房を行うと、夏季の収量増加が図られ、年間の生産額も増加する結果が得られた。バラ栽培におけるヒートポンプの導入は、重油価格高騰時の暖房費削減のみでなく、夏季の夜間冷房を組み合わせることで、経営的にさらに有利な条件となる。

夜間冷房に必要なヒートポンプは、冷房能力 61.7 W m^2 の規模のものであり、夏季の夜間冷房期間の気温を 2℃ 程度低下させることができる。夜間冷房は、冬期に暖房費削減を目的として導入したヒートポンプを利用しており、ヒートポンプを通年で有効活用できることにもなる。

バラ栽培におけるヒートポンプの導入は、重油価格高騰時における暖房費の削減になるだけでなく、夏季の夜間冷房によるバラの収量・品質向上に対する効果がある。暖房費削減効果と、夏季における収量・品質向上効果を加えると、2009~2010 年の電気料金であれば、A 重油価格が 32 円 L^{-1} 以上でヒートポンプの導入価格が償却でき、経営に大きな利益をもたらすことができることが明らかとなった。

第V章 ハイブリッドシステムのバラ栽培への応用（水分動態）

温室内の湿度環境は、バラの生育に大きく影響を与える(Darlington ら, 1992). ヒートポンプは、暖房だけでなく、夏季の夜間冷房や除湿にも利用できる. 電気料金は基本料金と従量料金で構成されており、電力の使用がなくても基本料金は課せられる. 暖房費削減のために導入したヒートポンプを、夜間冷房にも有効的に用いることができれば、年間を通してヒートポンプを有効活用できる. 夜間冷房は夏季のバラの収量増加に有効であるとの報告もある(森口ら, 1990).

ヒートポンプによる温室の夜間冷房については、温室内の水分動態を把握することも重要となる. バラは湿度が95%を超えると、べと病、灰色かび病など多くの病気が発生しやすくなる(酒井, 1996).

夏期は十分に個体の枝葉が繁茂しており、バラ群落の蒸散が冷房の除湿負担に与える影響が大きいことも予測される. バラ栽培においてヒートポンプを利用した夜間冷房が、バラの水分動態や、温室内の水分状態にどのような影響を与えるかの報告は少ない.

そこで、ヒートポンプを利用した夜間冷房が、温室内の温度・湿度環境に及ぼす影響、およびバラ栽培温室内の水分動態と、バラの蒸散量に及ぼす影響について検討した.

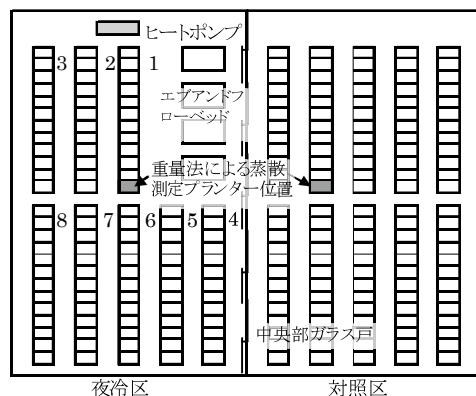


図 5-1 フェンロー型温室内の試験処理区. 中央部のガラス戸は日中開(08:00-18:00)夜間に閉 (18:00-08:00). 図中の数字はベッドナンバー.

材料および方法

1) 試験区の設置

試験区は、ヒートポンプによる夜間冷房を行う「夜冷区」と、夜間冷房を行わない「対照区」を、静岡県農林技術研究所内のフェンロー型温室の(写真 4-1)中央部を、ガラス戸で分

割することで設定した(図 5-1). 夜間冷房は、19時から翌朝7時までの間に行った. 日中8時~18時は、中央部のガラス戸を開放し、18時~8時の時間帯のみ、中央部のガラス戸で仕切った. 各処理区には循環扇を設置し、常時運転した. 床面積は夜冷区、対照区ともに、259.2 m² (間口 9.6 m, 奥行 27 m), 温室表面積は 634.0 m², 容積は 1410.0 m³ で同一である. 夜冷区のカーテン内部の容積は、936 m³ (間口 9 m, 奥行 26 m, 高さ 4 m)である. 温室の地表面は、ポリプロピレンフィルムシート(アグリシート, 日本ワイドクロス(株))で覆い、地表面からの蒸発を防止した.

2) バラの栽培概要

2005年4月20日に、バラの品種「ローテローゼ」(*Rosa hybrida* L. 'Asami Red') (写真 4-2)を定植し、アーチング栽培(Ohkawa and Suematsu, 1999, Lieth and Kim, 2001, Kim and Lieth, 2004)した.

バラの栽培は、グラスファイバー製の底面給液式プランター(MTポット, (株)プランツ, 以下プランターと呼ぶ), ポリフェノール培地(アクアフォーム, (株)プランツ)からなる養液栽培装置を用いた(写真 4-3). プランターは、内部が2重構造となっており、プランター上部から点滴で給液した養液は、ポリフェノール培地に吸収されるが、余剰養液はプランター内部に一定量貯留され、その後蒸発散に伴い、ポリフェノール培地に再び吸水される(図 4-1, 図 5-2).

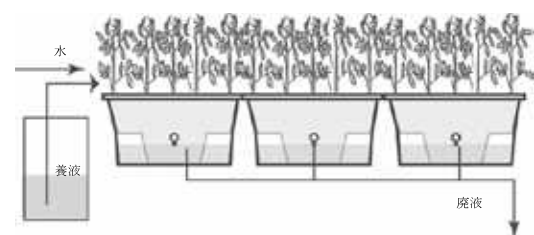


図5-2 バラのみかけの蒸発散量を測定した養液栽培装置(略図)

プランター内の貯留養液量が一定以上になると、排水口から外部へ養液が排水され、ポリフェノール培地が過湿状態になるのを防ぐ. 1つのプランターには、バラを10株定植した. プランターの設置状態を標準の大きさである 1000 m² の温室に換算すると、栽植密度は、5.692 株 m² となる. 実測した栽培株数は、通路が通常よりも多くあるため少ない(図 5-1). 栽培株数は夜冷区の一部には、エアアンドフロー方式のプールベンチが設置してありバラの栽培は無いため、259.2 m² の面積に夜冷区は1010株、対照区は1128株で、栽培株数は

夜冷区が 118 株少なかった。実測した栽植密度は、夜冷区が 3.900 株 m^{-2} 、対照区は 4.352 株 m^{-2} であった。

給液方法は、肥料と水を交互に与える方法を用いた。培養液処方、 $\text{NO}_3\text{-N}$:11.6, P :3.5, K :5.7, Ca :6.6, Mg :2.0 (me L^{-1})、微量元素は Fe :3, Mn :0.5, B :0.3, Cu :0.04, Zn :0.1, Mo :0.02 (ppm) を用いた。給液は、朝 6 時から夕方 17 時までの間にタイマー制御で 12 回行い、夜間の給液は行なわなかった。プランター表面からの蒸発を防ぐために、株元を除く表面全体を、農業用ポリオレフィン系特殊フィルム(ホワイトシルバー、東罐興業(株))で覆った。

3) 冷房に用いたヒートポンプの能力と温度設定

夜冷区の空気熱源式ヒートポンプの定格冷房能力は 12.5 kW であり(園芸用エアコン5馬力、三菱重工空調システム株、写真2-1)、床面積 1000 m^2 のフェンロー型温室(温室表面積 1770.9 m^2)へ表面積換算すると、34.9 W m^{-2} 相当となる。ヒートポンプによる夜間冷房の運転時間と設定温度は、19 時から翌朝 7 時まで 20°C に設定した。夜間冷房時は、夜冷区のみ温室上部を 2 層(上部:アルミカーテン PH-66, 下部:不織布カーテン LS-10S, ともに株誠和)、側面を 1 層カーテンで覆った。夜間冷房時の対照区は、20°C に設定した天窓、側窓の開閉のみで温度制御した。夜間冷房によるバラ栽培温室の水分状態計測試験は、2008 年 7 月 20 日から 7 月 24 日まで行った。

4) 温湿度、日射量の計測

乾球温度と相対湿度は温湿度センサ(MR9202, (株)チノー)、それを接続するカードロガー(MR6662, (株)チノー)を用い、10 分間隔で測定した。センサを、風速約 3 m s^{-1} で常時通風している筒状容器内に入れ、各処理区 9 ケ所 1.5 m の高さで測定した。絶対湿度および飽差は、乾球温度と相対湿度から算出した。また、温室内部保温カーテンの内外の絶対湿度の測定のため、2008 年 8 月 1 日から 8 月 8 日まで、保温カーテン上部と外部被覆資材の間の 4.6 m の高さにもカードロガーを設置し温度・相対湿度を測定した。日射量は、小型セル日射センサ(IKS-37, 小糸工業株)で測定した。

5) 温室の換気回数の計測

換気回数は、岡田(岡田, 1988)によるガストレーサー法により測定した。温室内のカーテン内部へ液化炭酸ガスを用いて CO_2 を 1500 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 以上にした後、温室内外の CO_2 濃度変化を CO_2 センサ(GMT222, VAISALA 製)で測定し、濃度の経時的変化から Eq. (5-1)により換気回数を求めた。

$$N = \ln((C_i - C_0) / (C_t - C_0)) / t \quad \text{Eq. (5-1)}$$

N 換気回数 (h^{-1}), C_0 初期 CO_2 濃度 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), C_t t 時間後の CO_2 濃度 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), C_0 外気 CO_2 濃度 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), t 時間(h)

戸外の風速は、温室外に設置した風杯型風速計で測定した。試験期間は、2007 年 11 月 12 日、11 月 13 日、11 月 29 日、12 月 6 日、2008 年 1 月 15 日、3 月 11 日、3 月 12 日の夜間から翌日未明まで、合計 7 回測定した。

6) 重量法によるみかけの蒸発散量の計測

夜間冷房時のみかけの蒸発散量は、温室中央部にバラを定植したプランター 1 個(図 5-3)を電子ばかり(FT-30KA4, エーアンドディー(株))に常時載せ、1 時間間隔で重量を連続計測することで求めた。測定は、夜冷区と対照区各 1 ケ所で行った。夜間冷房による水分動態の測定は、2008 年 7 月 20 日から 7 月 24 日まで行った。プランター重量の減少 1 g を、重量法に基づくみかけの蒸発散量 1 mL として換算した。

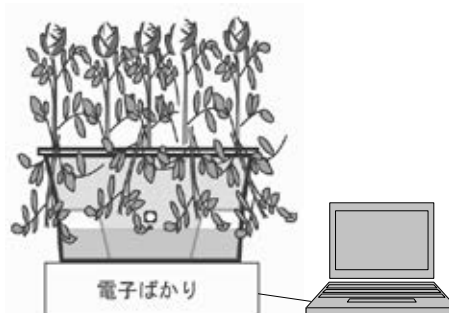


図 5-3 重量法によるバラのみかけの蒸発散量測定装置

プランター 1 個の重量計測から、温室全体の蒸発散量を推測するために、測定値には大きな誤差が生じると推測される。そこで、夜冷区の各栽培ベッドの 1 日単位の蒸発散量を給液量と排出量の計測し、蒸発散量の補正に用いた。夜冷区の 1 日単位のみかけの蒸発散量は、水道メータ(SD13S, 愛知時計電気(株))を用い、給液量と排水量の差から算出した。夜冷区の温室内部には、合計 8 列の栽培ベッドを設置した(図 5-1)。栽培ベッドは、12 個のプランター 3 列と、13 個のプランター 5 列で構成される。みかけの蒸発散量は、各栽培ベッドの給液量と排水量の差から算出した(図 5-2)。

7) 除湿量の計測

ヒートポンプによる夜間冷房で、熱交換器に凝集し排水された水量を、除湿量とみなした。ヒートポンプから排水される水量は、転倒ます型雨量計(大起理化工業(株))で測定し、パルスロガー(RVR-52, (株)ティアンドデイ)で記録した。

1) 重量法に基づく蒸発散量測定時のプランター容器表面からの蒸発量

プランター容器表面からの蒸発量を把握するために、バラを定植していないプランター 1 個と、バラを栽培しているプランター 1 個の両方の培地表面を、農業用ポリオレフィン系特殊フィルムで被覆面積率を変え、それぞれの重量を電子ばかり(FT-30KA4, エーアンドディー(株))で計測し、重量の減少値から蒸発量およびみかけの蒸発散量を求めた(図 5-3)。両プ

ランターともに、同一温室内に設置した。

蒸発量を見かけの蒸発散量で除することで、みかけの蒸発散量に対する培地面からの蒸発量の比率を求めた。農業用ポリオレフィン系特殊フィルムの培地被覆の面積を変え、培地面からの蒸発量の比率を求めた。測定は、2008年2月8日から2月22日の18時から翌朝6時までの夜間に、計14回行った。

2) 水分収支法に基づくバラの蒸発散量の測定

温室の夜間冷房中におけるバラからの蒸発散量測定時に、外部から流入する空気中の水分量は、Eq. (5-2)で求めた。

$$S = 1/1000 \times V \times N \times t \div v \times \beta \times (AH_{out} - AH_{in}) \quad \text{Eq. (5-2)}$$

S 外部から流入する水分量(L), $1/1000$:mL から L への変換, V :温室容積(m^3), N 換気回数(h^{-1}), t 時間(h), v :温室空気の比容積 ($m^3 \text{ kgDA}^{-1}$), β :蒸発した水の質量から体積への変換 ($mL g^{-1}$), AH_{in} , AH_{out} :温室内外の絶対湿度($g \text{ kgDA}^{-1}$)

夜間冷房開始前後の絶対湿度値から算定した温室内空気中の水分変化量は、下記のEq. (5-3)で推測した。

$$A = V \div v \times \beta \times (AH_i - AH_e) \quad \text{Eq. (5-3)}$$

A :温室空気中の水分変化量(L), V :温室容積(m^3), v :温室空気の比容積 ($m^3 \text{ kgDA}^{-1}$), AH_i , AH_e :夜間冷房開始前後の絶対湿度 ($g \text{ kgDA}^{-1}$)

温室の水収支にもとづき、ヒートポンプによる除湿量、絶対湿度変化による温室空気中の水分変化量、外部から流入する水分量から、バラの夜間の蒸発散量を下記のEq. (5-4)で推測した。

$$Et = Dh - S - A \quad \text{Eq. (5-4)}$$

Et :バラからの蒸発散量 (L), Dh : ヒートポンプによる除湿量 (L), S 外部から流入する水分量(L), A :温室空気中の水分変化量(L)

夜間冷房時における温室内の水分動態の測定は、2008年7月20日から7月24日までの間で4回測定した。

結 果

1) 夜間冷房による温室環境の変化

ヒートポンプによる夜間冷房運転時の、2008年7月20日12時から24日12時までの、温室内の温度変化を図5-4に示した。

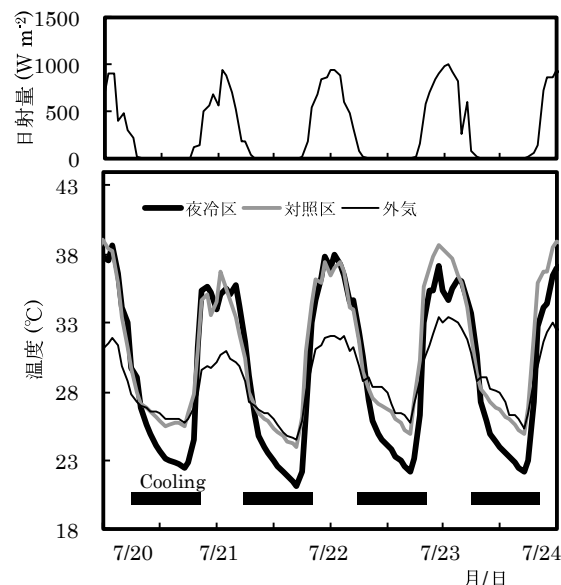


図5-4 2008年7月20日から24日の間の処理区の気温と外気温及び戸外の日射量

7月20日から21日の測定値を一例として示すと、17時以降19時の夜間冷房開始までは、夜冷区と対照区にほぼ同じ温度であった。19時から冷房を開始すると、夜冷区の温度は低下し始めた。冷房開始1時間後には、対照区が27.2°Cであるのに対し、夜冷区は26.8°Cと、約0.4°C低下した。1時間30分後の20時30分には、対照区が27.0°C、夜冷区は26.1°Cで、対照区と比較し0.9°C低下した。5時間後の0時には、対照区が25.9°C、夜冷区は23.6°Cと、2.3°C低下した。5時以降日の出により日射が増加すると温度は上昇した。ヒートポンプを停止した翌朝7時以降は、温度は更に上昇し、停止1時間後の午前8時には対照区と同様の温度となった。対照区は、夜間には窓が20°C以上では開放状態となるため、夜間の温度は外気温とほぼ同様であった。その他の測定日も、ほぼ同様の傾向であった。

夜間の対照区の相対湿度は、温室の窓が開放状態であるが、80~90%と外気の相対湿度よりも3~6%高い値で推移した(図5-5)。

2008年7月20日~24日の試験期間中の外気の相対湿度は、いずれの日も日没後から日の出まで、徐々に上昇していた(図5-5)。夜冷区の相対湿度は、夜間冷房の開始以後対照区と比較して低い値となった。7月20日の夜間冷房開始1時間後は、対照区が79.7%であったが、夜冷区は77.3%まで低下した。5時間後の0時には、対照区が85.3%であったのに対し、夜

例区は77.1%に低下した。ヒートポンプを停止した朝7時以降は、気温の上昇にともない夜冷区の相対湿度は低下し、対照区と同様の相対湿度となった。測定期間中の夜間の相対湿度の変化は、いずれも同様の推移をし、対照区は外気よりも相対湿度が高く、夜冷区は低く推移した(図5-5)。

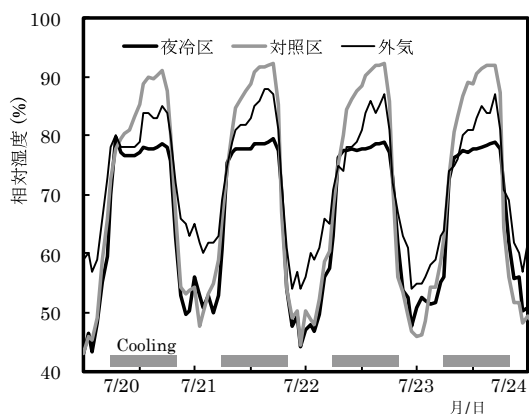


図5-5 2008年7月20日から24日の間の処理区及び外気の相対湿度

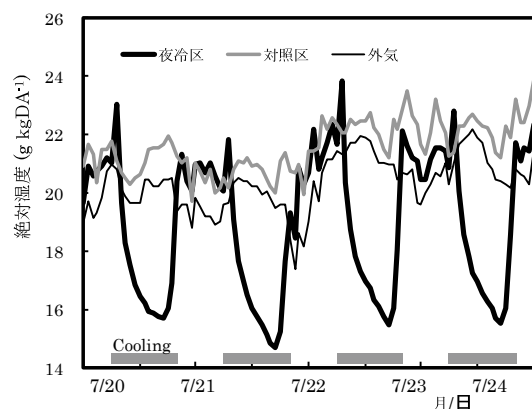


図5-6 2008年7月20日から24日の間の処理区及び外気の絶対湿度

7月20日の温室内の絶対湿度は、ヒートポンプ稼働直前の19時では夜冷区が23.0 g kgDA⁻¹、対照区が21.1 g kgDA⁻¹と、夜冷区が高かったが、ヒートポンプの稼働により夜冷区の絶対湿度は低下し、30分後の19時30分には、夜冷区が対照区よりも低い値となった。7月21日の午前5時の対照区の絶対湿度は21.6 g kgDA⁻¹で、夜冷区の絶対湿度15.7 g kgDA⁻¹よりも高い値であった。このような傾向は、試験期間中ほぼ同様であり、夜間冷房により温室内の絶対湿度は大きく低下した(図5-6)。

2008年8月1日から8月8日まで19時から翌朝5時まで測定した絶対湿度の平均値は、カーテン内の1.5 mの高さでは15.1 g kgDA⁻¹、カーテン上部と外部被覆資材の間の4.6 mの高さで16.4 g kgDA⁻¹、戸外は22.2 g kgDA⁻¹で、保温カー

テン内、保温カーテンと外部被覆資材の間、戸外の順に絶対湿度は高くなった。

温室内では17時以降温度が低下し、相対湿度が上昇するに連れ、飽差は小さくなった(図5-4,図5-5,図5-7)。ヒートポンプによる夜間冷房で温度は低下するが、除湿により絶対湿度は低下するために、夜冷区の飽差は対照区よりも大きく、翌朝5時には夜冷区の飽差が、対照区よりも約0.3 kPa大きくなった。夜冷区の飽差は、ヒートポンプが停止した朝7時以降には、対照区と同様の値となった(図5-7)。

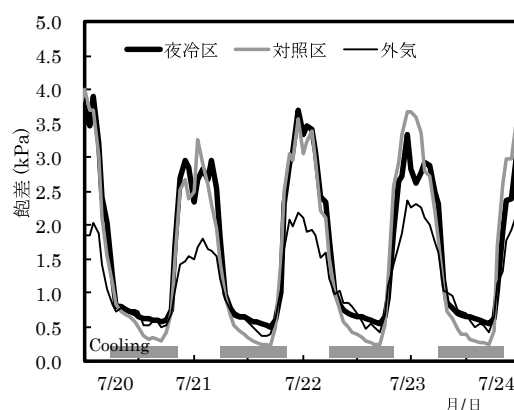


図5-7 2008年7月20日から24日の間の処理区及び外気の飽差

2) 夜間冷房による栽培プランターの重量変化

プランターは、バラ10株、ポリフェノール培地、養液を合わせると、約36 kgであった。このプランターの重量を、電子ばかりで連続計測し、その変化から重量法によるバラのみかけの蒸発散量を計測した。夜冷区と対照区の重量の変化を比較するために、2008年7月20日の12時の重量を100とし、その後の24時間の重量変化の相対値を図5-8に示した。

夜冷区、対照区共に日中のプランター重量は、給液による増加と、蒸発散による減少を繰り返した。18時の給液終了後は、夜間の蒸発散により徐々にプランター重量は減少した。19時の夜間冷房開始以降は、夜冷区での蒸発散量が増加し、夜冷区での重量減少が対照区の重量減少を上回った。翌朝6時の給液開始以降、日中は、夜冷区、対照区共に、給液による重量の増加と、蒸発散による重量の減少を繰り返した(図5-8)。

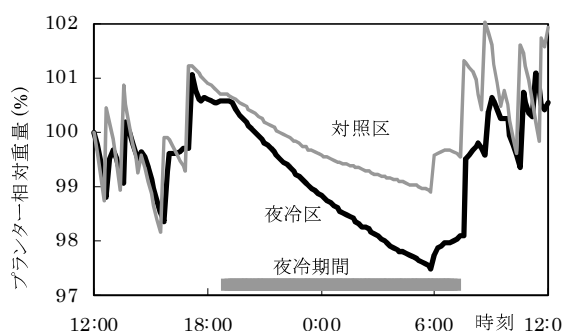


図5-8 夜冷区と対照区のプランターの相対重量変化

3) プランター表面被覆が蒸発散量に及ぼす影響

夜間の蒸発散量測定時において、みかけの蒸発散量計測に及ぼす、プランター表面からの蒸発量の影響について調査した(表5-1)。プランター表面を、農業用ポリオレフィン系特殊フィルムで0~100%まで5段階の被覆率で覆い、バラ植物体の有無による蒸発散量の違いを測定した。測定は、2008年2月8日から2月22日の、冬季暖房時の夜間に行なった。測定時の飽差は、0.8 kPa 前後であった。

プランターの表面をまったく覆わない場合、バラがあるプランターの蒸発散量は 60.1 mL h^{-1} であったのに対し、バラ植物体の無いプランターの蒸発量は 7.8 mL h^{-1} で、比率は13%であった。プランター表面全体を農業用ポリオレフィン系特殊フィルムで覆った場合には、バラ植物体のある場合に対する、バラ植物体の無い場合の比率は1.8%とわずかな値

であった。

4) 夜間冷房によるバラの蒸発散と温室内飽差の関係

重量法により求めたバラの夜間のみかけの蒸発散量と、夜間冷房による除湿の関係について検討した。測定は、2008年7月20日から7月24日の間に行った。試験期間における、バラの夜間のみかけの蒸発散量は、1株当たり $3 \sim 14 \text{ mL h}^{-1}$ であった(図5-9)。

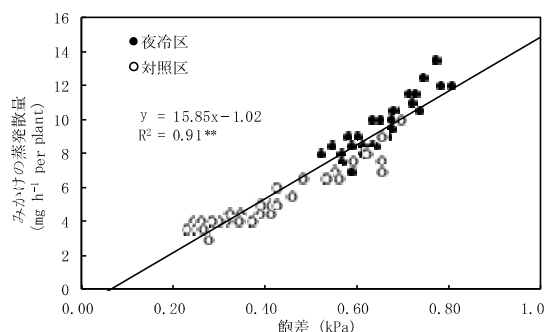


図5-9 バラの夜間みかけの蒸発散量と飽差の関係

試験期間中の対照区の平均飽差は0.41 kPaであり、夜冷区の平均飽差は0.65 kPaで、夜間冷房により飽差は大きくなった。また、試験期間中日射の影響を受けない夜間(19時~5時)の対照区のみかけの蒸発散量の平均値は、1株当たり 5.2 mL h^{-1} であったが、夜冷区の夜間のみかけの蒸発散量の平均値は1株当たり 9.6 mL h^{-1} と、みかけの蒸発散量が夜間冷房により増加した。夜冷区・対照区のみかけの蒸発散量は、飽差を

表5-1 バラ栽培プランターの地表面被覆が夜間のみかけの蒸発散量に及ぼす影響^z

表面積被覆率 (%)	バラのみかけの蒸発散量 (ET) (mL h^{-1} per planter)	植物が無い場合の蒸発量 (B) (mL h^{-1} per planter)	比率 (B / ET) (%)	飽差 (kPa)
0	60.1	7.8	13.0	0.70
26	81.0	8.9	10.9	0.88
66	80.1	4.7	5.8	0.91
83	58.1	3.2	5.6	0.86
100	74.4	1.3	1.8	0.80

^z 測定は2008年2月8日から21日の夜間 (18:00から6:00)に行った。

表5-2 試験実施温室の換気回数の測定

月日	測定時間帯	CO ₂ 濃度 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)			換気回数 ^z (h^{-1})	戸外風速 (m s^{-1})
		開始時	終了時	外気		
11/12	21:00 to 23:00	2,163	902	453	0.67	3.5
11/13	19:00 to 23:00	3,646	1,597	468	0.34	0.0
11/29	19:00 to 23:00	2,421	1,111	462	0.37	0.8
12/6	19:00 to 23:00	2,278	1,015	488	0.41	0.4
12/7	19:00 to 23:00	2,772	1,617	479	0.23	0.0
3/11	19:00 to 22:00	1,538	769	449	0.41	1.2
3/12	20:00 to 22:00	1,900	1,175	475	0.36	2.0

^z 換気回数は(N)以下の式により求めた。

$$N = \ln((C_i - C_0) / (C_t - C_0)) / t$$

C_i :開始時CO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$), C_0 :外気CO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$),

C_t :t時におけるCO₂濃度($\mu\text{mol mol}^{-1}$)

説明変数とした同一の直線回帰で表すことができた(Eq. 5-5 $R^2 = 0.91^{**}$, ** は1% 水準で有意差あり), 飽差が大きいとみかけの蒸発散量も増加した(図5-9). 夜冷区ではヒートポンプによる除湿効果で, 飽差, みかけの蒸発散量とも大きな値となった.

$$Et = 15.85 \times VPD - 1.02 \quad \text{Eq. (5-5)}$$

Et : みかけの蒸発散量 (L) VPD : 飽差 (kPa)

5) 試験温室の換気回数

温室の夜間冷房時の水分の動態を解析するために, 温室の換気回数を測定した. 夜間に温室内へ CO_2 を液化炭酸ガスで補給し, その後温室内の CO_2 の変化から, Eq. (5-1)により試験温室の換気回数を求めた(表5-2).

液化炭酸ガスの補給により, 温室内の CO_2 濃度を1500~3600 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ まで高めた. その後 CO_2 濃度は徐々に低下し, 2~3時間後には700~1600 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ にまで低下した

(図5-10). 測定した温室の換気回数は, 0.23~0.67 h^{-1} であった. 7回の換気回数の測定結果と, 外気の風速との関係では, 外気の風速が大きくなると, 換気回数も増加する関係が見られた. 両者の関係はEq. (5-6)の直線回帰で表すことができた($R^2 = 0.71^*$, * は5% 水準で有意差あり). ヒートポンプによる夜間冷房時の水分動態を求めるには, 下記のEq. (5-6)に基づき外気の風速から, 換気回数を推測してその値を使用した.

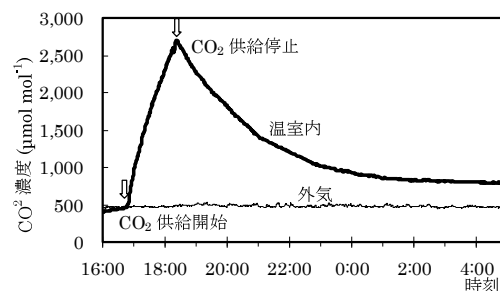


図5-10 換気回数測定時の温室内外 CO_2 濃度の変化

表5-3 2008年7月20日から23日までのベッド位置によるバラの日中のみかけの蒸発散量

	月日	栽培ベッド番号							
		1	2	3	4	5	6	7	8
みかけの蒸発散量 ^z (mL day^{-1} per plant)	7/20	749	467	500	446	485	362	531	239
	7/21	549	368	390	405	379	268	536	183
	7/22	459	398	560	518	467	301	625	225
	7/23	550	675	783	515	462	454	608	292
	平均	577	477	558	471	448	346	575	235
比率 ^y (%)		100.0	82.8	96.8	81.7	77.7	60.0	99.7	40.7

^z みかけの蒸発散量は以下の方法で算出した:

みかけの蒸発散量 = (栽培ベッドへの給液量 - 廃液量) / 株数

^y 栽培ベッド番号1のみかけの蒸発散量を100とした時の値.

重量法による蒸発散量測定はベッド番号1で行った.

表5-4 2008年7月20日から24日までの各ベッドごとのバラの夜間のみかけの蒸発散量.

夜間のみかけの蒸発散量 ^y		夜間のみかけの蒸発散量のベッド別推測値 (L)								合計 (L)
月日 ^z	(mL per plant)	ベッド番号								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
7/20-21	103.0	12.4	10.2	12.0	10.9	10.4	8.0	13.4	5.4	82.8
7/21-22	96.5	11.6	9.6	11.2	10.3	9.7	7.5	12.5	5.1	77.5
7/22-23	89.0	10.7	8.8	10.3	9.5	9.0	6.9	11.5	4.7	71.5
7/23-24	96.0	11.5	9.5	11.2	10.2	9.7	7.5	12.4	5.1	77.1
栽培株数 (株)		120	120	120	130	130	130	130	130	1010

^z 測定は19:00から5:00までの間に行った.

^y 重量法により測定したみかけの蒸発散量に基づき表5-3の係数を掛けて求めた各ベッドの蒸発散量.

表5-5 バラ温室におけるヒートポンプによる夜間冷房期間中の水分動態.^z

測定月日	ヒートポンプ による除湿量 (Dh)	外気の平均 絶対湿度 (AH_{out}) g kgDA^{-1}	温室内平均 絶対湿度 (AH_{in}) g kgDA^{-1}	外気から流入 する水分量 (S) ^y L	温室内絶対湿度		温室内空気中 の水分変化量 ^x (Δ) L	水分収支法により求め たみかけの蒸発散量 ($Dh \cdot S \cdot \Delta$) L	重量法により 求めたみかけ の蒸発散量 ^w L
					計測開始 時 (VH_i) g kgDA^{-1}	計測終了 時 (VH_e) g kgDA^{-1}			
7/20 ~ 7/21	115.9	20.15	17.19	12.5	23.0	15.7	10.3	93.1	82.8
7/21 ~ 7/22	114.4	20.15	16.58	15.1	21.9	14.7	10.1	89.2	77.5
7/22 ~ 7/23	120.0	21.48	17.55	16.6	23.8	15.4	11.8	91.6	71.5
7/23 ~ 7/24	117.6	21.46	17.44	17.4	22.8	15.5	10.3	89.8	77.1
平均	117.0	20.81	17.19	15.4	22.9	15.3	10.6	90.9	77.2

^z 測定は19:00から5:00までの間に行った.

^y 水分動態は1410.0 m^3 の温室で行った. 外気から流入する水分量はEq.(5-2)により求めた.

^x 温室内空気中の水分変化量はEq. (5-3)により求めた.

^w 表5-4に示した重量法により求めたみかけの蒸発散量.

考 察

1) 蒸発散量の測定について

本試験に用いた温室の夜冷区と対照区は、面積が同一ではあるがバラの栽植本数は、夜冷区は1010株、対照区は1128株とやや異なる。しかしながら、条間や栽培プランターに定植した本数は同一であるため、栽培プランターの設置してある面積における栽植密度は同一であり、同一の栽植密度として扱った。第III章で示しているように、ヒートポンプも重油式温風暖房機もほとんど稼働しない、10月の夜間の温室内の相対湿度、絶対湿度、飽差は夜冷区と対照区はほとんど同じであり、バラへの蒸散に対する栽植本数の差の影響は少ないものと判断した(表5-1)。また、重量法によりプランターの蒸発散量を正確に求めるためには、プランターの重量すべてを計測する必要があるが、ここでは代表する1プランターのみを計測している。栽培ベッドの位置により、葉面積や生育状況が異なり、蒸発散量も異なる可能性がある。そこで、夜間の蒸発散量の推測値を向上するために、日中の蒸発散量を給液量と排液量の差から算出し、その比率を葉面積や成育の差と仮定して夜間の蒸発散量の係数として用いた(表5-3)。

本試験のバラは、アーチング栽培した、Shimomuraら(2003)の計測結果によると、バラのロックウールアーチング栽培の葉面積指数は、定植8ヵ月後から11ヶ月までは3で大きな変化はなかった。このことから判断すると、本試験は7月の4日間の測定ではあるが、成熟した植物体で測定を行っており、下位等級の切花を随時折り曲げるアーチング栽培の場合では、葉面積指数に大きな変化はないと考えられ適用範囲も広いと推測される。

2) ヒートポンプによる夜間冷房が環境条件に及ぼす影響について

ヒートポンプにより夜間冷房を行うと、温室内の気温が低下し、同時にヒートポンプにより除湿されるため絶対湿度は低下する。ヒートポンプの冷房能力が 34.9 W m^{-2} の場合は、除湿量が 11.7 L h^{-1} であり(表5-5)、相対湿度もゆるやかに低下した。飽差は除湿により上昇し、冷房開始後から冷房終了時までの間、対照区との差は次第に大きくなった(図5-7)。

3) 夜間冷房がバラの蒸発散量に及ぼす影響について

バラ栽培プランターの重量計測で、培地表面からの蒸発を検討した結果、培地表面をポリオレフィン系特殊フィルムで覆えば、培地表面からの蒸発量は、みかけの蒸発散量の1.8%程度であり、測定誤差の範囲内といえる。

夜間のバラプランター重量変化では、夜間冷房処理により重量が大きく減少した(図5-8)。温室内の飽差と、バラのみかけの蒸発散量には直線回帰がみられた(図5-9)。夜冷区においては、除湿により飽差が大きくなり、みかけの蒸発散量も大きな値となった。これらの結果から、ヒートポンプにより夜

$$N = 0.089W + 0.30$$

Eq. (5-6)

N : 換気回数 h^{-1} W : 外気風速 ms^{-1}

6) 重量法によるバラの蒸発散量の推測

プランターの重量変化から、夜間のバラのみかけの蒸発散量を測定した。みかけの蒸発散量は、バラを10株定植してあるプランター1つを重量測定した値を用いた。プランターの設置場所や生育状況により、夜間の蒸発散量が異なる可能性があるため、各ベッドの日中のみかけの蒸発散量の値に基づき、温室内全体の夜間の蒸発散量を推測した。

各ベッド単位で求めた、2008年7月20～23日のみかけの蒸発散量の日平均は、1株当たり $243 \sim 557 \text{ mL day}^{-1}$ で、ベッド間でのばらつきが大きかった(表5-3)。これらのみかけの蒸発散量の値を用い、重量測定を行っているBed number 1(図5-1)を100とし、その他のベッドの比率を求めた(表5-3)。重量測定により求めた夜間のみかけの蒸発散量に、比率と株数を乗じて、バラの夜間の温室内全体のみかけの蒸発散量を求めた(表5-4)。

7) 温室内の水分収支によるバラの蒸発散量の推測

夜間冷房中のヒートポンプによる除湿量と、温室内の絶対湿度変化から、温室内の水分収支によりバラの蒸発散量を推測した。7月20日19時から7月21日5時までの、ヒートポンプによる除湿量は 115.9 L であった(表5-5)。この間に換気により室内に入ってきたと推測される水分量は、Eq. (5-2)により 12.5 L であった。また、7月20日19時の夜間冷房開始時の温室内絶対湿度 23.0 g kgDA^{-1} から、測定終了時の7月21日5時の絶対湿度 15.7 g kgDA^{-1} の変化による、大気中の水分減少量はEq. (5-3)により 10.3 L であった。Eq. (5-4)により 115.9 L から 12.5 L と 10.3 L を差し引いた 93.1 L が、バラ栽培プランターからの蒸発散量、および結露などによる水分損失であると推測された。

この時間帯の重量測定によるみかけの蒸発散量は、1株当たり 103.0 mL であった(表5-4)。この値にベッドごとの係数と(表5-3)、株数を乗じて求めた重量法によるバラのみかけの蒸発散量の総計は、 82.8 L であった(表5-4、表5-5)。水分収支法により算出した蒸発散量と比較すると 10.3 L 少なかった。7月21日以降の夜間温室における3回の測定値結果も、7月20日の測定とほぼ同様で、いずれの場合にも重量法で算出したバラ栽培プランターの蒸発散量が、水分収支法により算出したバラ栽培プランターの蒸発散量より少なかった(表5-5)。

間冷房を行うと、除湿により温室内の飽差が大きくなり、バラの夜間のみかけの蒸発散量が増加することが明らかとなった。

これらの事は、温室の温度低下のために稼働するヒートポンプが、除湿のためにエネルギーが使われることになり冷房効率が低下する要因にもなる。

4) ヒートポンプによる除湿の水分動態

今回の測定期間において空気中の絶対湿度の変化、外気から流入した水分量から推測した水分収支法によるバラの蒸発散量は、ヒートポンプによる夜間冷房により除湿した水分量の、76~80%の量に相当した(表5-5)。

北宅(2003, 2009)の温室内外の主な水の出入り図によれば、換気、かん水、蒸発、空気中の水蒸気、温室内ガラス面と植物体への付着、土壌水、地下水、作物の吸水、温室内面と植物体からの水の落下、浮遊液状水、植物体貯留が水分動態に関与している。

北宅の概念図と比較すると、今回の蒸発散量の比較では、温室内ガラス面と植物体への付着、土壌水、地下水、浮遊液状水を含んでいない。試験温室の土壌表面は、ポリプロピレンフィルムシートで覆い、地表面からの蒸発を防止しているため、地表面からの水分蒸発は少ないと考えられる。また、栽培プランター表面もポリオレフィン系特殊フィルムで被覆しており、プランター表面からの蒸発量も、バラの蒸発散量の1.8%とわずかな値と推測される。この結果から、今回の試験条件では、土壌水分の空気中への蒸発は数%と考えられる。

温室被覆ガラス面内部への付着水分量は、温室暖房時期に外気が低温となるため発生するが、夏季夜間冷房の場合には、夜間の外気は温室内よりも高温となり露点温度も高くなるため、被覆ガラスの内面における付着水の発生はほとんど無いと考えられる。また、植物体への付着水も考慮に入れていないが、19時から翌朝5時まで冷房により温度が低下を続けている状況であり、植物体への付着水もわずかなものと推測される。

温室の保温カーテンへの付着水も、Eq.(5-4)では考慮していない。2008年8月1日から8月8日まで測定した夜間冷房期間中の絶対湿度平均値の保温カーテンの内部と外気の差は 7.2 g kgDA^{-1} であり、温室内保温カーテン上部と内部の絶対湿度の差は 1.3 g kgDA^{-1} であった。この差の比率である外気の絶対湿度の18.8%を、保温カーテンの内外の絶対湿度の比率と仮定し、保温カーテンへの吸水量をEq.(5-2)を用いて算出すると、吸湿量は1.9 L程度と推測される。

これらのことから、今回の測定値の不一致の大きな要因は、重量法により算出したバラの蒸発散量であると考えられる。重量法から求めた蒸発散量で、全体の蒸発散量を推測する時

に、ベッドごとの1日のみかけの蒸発散量から求めた値を係数として用いた。古在ら(1982)は、温室栽培のキュウリにおける蒸発散量と環境要因の解析で、夜間の蒸発散量は、全日平均蒸発散量の17%を占め、夜間の平均室内空気飽差と相関が高いことを報告している。

バラの日中のみかけの蒸発散量は、ベッドの位置や、バラの生育状況により、かなりのばらつきが見られた(表5-3)。表5-3により求めた蒸発散量の平均値は 461 mL day^{-1} で、標準偏差は ± 143.3 、変動係数31%であった。表5-5に示した、空気中の水分量の変化から求めた蒸発散量と、重量法により求めた蒸発散量との差は10.4~20.1 Lで、空気中の水分量変化から求めた蒸発散量の11~22%であり、いずれの日でも誤差の範囲内に含まれる。

以上のことから、バラ栽培におけるヒートポンプを用いた夏季夜間冷房において、バラの夜間の蒸発散量は増加した。またヒートポンプによる除湿量、温室内の絶対湿度変化、戸外から流入する水蒸気量を要素として水分収支法により求めた夜間のバラの蒸発散量は、栽植密度が 3.9 株 m^{-2} の条件ではヒートポンプによる除湿量の約76~80%に相当した(図5-11)。

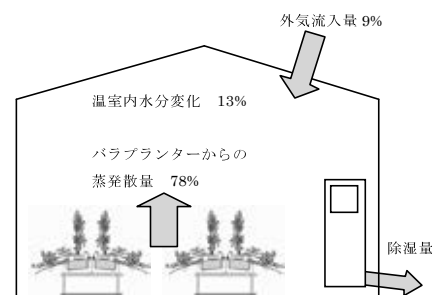


図 5-11 ヒートポンプによる夜間冷房が水分動態に及ぼす影響数値(除湿量に占める割合(%))

第VI章 ハイブリッドシステムへの太陽光発電による 再生可能エネルギーの利用

第三章において、バラ栽培温室にヒートポンプと重油式暖房機を併用するハイブリッドシステムを導入することで、試験期間中の2009～2010年の電気料金、A重油実勢価格65.8円/L¹では、年間冷暖房費が慣行の重油式暖房機と比較して約24%削減でき、投入エネルギーは46%削減できることを明らかにした。また、第四章においては、ヒートポンプによる夏季高温期の夜間冷房により、夏季の収量及び品質が向上し、年間の生産額は、ハイブリッド区で415円/m²粗収益が対照区よりも増加し、ヒートポンプ導入の有効性を明らかにした。

しかしながら、化石エネルギーであるA重油価格の変動は大きく(図1-1)、有限な資源であるため、今後も価格が高騰する可能性は極めて高い。今後も持続的かつ安定的に施設園芸を営営するためには、更なる省エネルギー技術の導入や、冷暖房における再生可能エネルギーの利用が重要となる。

日本では、2012年に再生可能エネルギーの固定価格買取制度が始まり、再生可能エネルギーの導入が進んでいる。中でも太陽光発電は、機器の維持管理が比較的容易であり、導入が著しく増加している(平成24年度 エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書)<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2013/2-1.pdf>。発電設備導入状況<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/dl/setsubi/201312setsubi.pdf>。2014年3月31日参照)。

農業施設においても、ハウスの窓の開閉(杉浦ら, 2002)、細霧冷房装置の動力源(谷野, 2005)などへの応用例が検討されている。また、温室のガラスに利用する、透過型太陽光パネル(Carliniら, 2010)についての報告もある。安武ら(2008)は、太陽光発電と風力発電による電力で地中熱暖房装置を稼働させる省エネルギーシステムを報告している。

研究段階では、太陽光発電の施設園芸利用の取り組みが行われているが、実用レベルで、ヒートポンプの電力源として太陽光発電を利用した報告は少ない。

NEDO 日射データベース閲覧システムの全日射量年平均によると(<http://app7.infoc.nedo.go.jp/colormap/colormap.html> 2014年3月31日参照)、静岡県は全国的に見ても、山梨、長野県や太平洋沿岸静岡県以西の太平洋沿岸と同様に、全日射量が多い地域であり、太陽光発電には好適地である。また、温室メロンやバラ、ガーベラなど施設園芸が盛んで、野菜・花き・果樹用を含めた園芸用施設面積は全国13位である(園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査(平成20年～21

年)<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=0000010744> 17 2014年4月1日参照)。日射量が多く施設園芸の盛んな静岡県で、施設園芸に太陽光発電の導入可能性を検討することは有意義である。

ここでは、施設園芸における再生可能エネルギー利用の可能性を検討するために、維持管理が比較的容易な太陽光発電装置と、ヒートポンプによるハイブリッドシステムの組み合わせにおいて、発電量と消費電力がどのような関係になっているのか、更には施設園芸における太陽光発電導入の可能性について検討した。

静岡県経済産業部農林業局は、2011～2012年度の「太陽光発電農業促進実証モデル事業」で、静岡県御前崎市においてヒートポンプを導入している温室に隣接する耕作放棄地に、太陽光パネルを設置し発電量と消費電力の調査を行った。

事業で実測した2011年11月から2012年10月までの太陽光パネルによる発電量のデータと、第三章および第四章においてバラ栽培温室で実測した、2009年6月1日から2010年5月31日の間のヒートポンプの消費電力の値から、ヒートポンプハイブリッドシステムを利用したバラ栽培における、太陽光発電の有効性について検討した。

材料および方法

1) 太陽光パネル設置場所及び調査期間

太陽光発電パネルは、静岡県御前崎市の温室と、隣接する耕作放棄地(北緯34.6°、東経138.2°)に設置した。耕作放棄地の面積は666m²で、2011年11月1日から2012年10月31日まで発電量を計測した。

2) 太陽光パネルと設置条件

太陽光パネルは、単結晶シリコンパネル(195W, NE125×125-72-M(L)SI195W, 大きさ158×80.8×3.5cm, ネクストエナジー・アンド・リソース(株))を用いた。公称最大出力はパネル1枚当たり195W枚¹で、60枚のパネルを設置し、公称最大出力は合計11.7kWであった。

太陽光パネルの傾斜角度を決定するために、(独)新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)日射量データベース閲覧システム(<http://app7.infoc.nedo.go.jp/index.html>, 2014年3月17日参照)、年間月別データベース MONSOLA-11における静岡県御前崎市のデータに基づき、太陽光パネルの角度と方

位角の検討を行った。

御前崎市における最適傾斜角は季節によって異なり、太陽高度の高い5～7月は傾斜角 10° 以下が最適角度で、冬季は 60° の角度が最適で、年間の最適傾斜角は 32.5° であった。

傾斜角が小さいと太陽光パネルが背面につくる影の距離が小さくなるため、太陽光パネル間の離隔距離が狭くなる分、土地を有効活用することが可能となる。ただし、一般的に、太陽光パネルに付着した砂埃や鳥の糞などが、雨によって取り除かれる最低の傾斜角は 10° とされていることから、最低角度以上の傾斜を持たせることが望ましい。これらのことから、太陽光パネルの傾斜角は 10° と 32.5° の2つの角度で設置した。

パネルは、杭打した単管パイプを架台として5段6列を2セット配置した。NEDOの「太陽光発電の効果的な導入のために」(太陽光フィールドテスト事業に関するガイドライン[設計施工・システム編]策定委員会, 2010)によると、影の長さの簡易推測は、東京では障害物の高さの2.139倍を乗じた値としている。このためパネル間の離隔距離は、パネル高さを h とした時、 $2.139 \times h$ (m)以上離隔を取ることを推奨している。そのため、傾斜角の緩いアレイを南側に配置し2.86 m離して設置した。

太陽光パネルは土地の有効利用を考えて、隣接する道路と平行に設置した。道路は東西方向に対して約 15° の傾きであったため、パネルも東側を約 15° 南方に傾けて設置した。

傾斜角 32.5° のパネルと同一の傾斜面に、全日射計(LP PYRA03, デルタオーム社製)を設置し、全日射量を測定した。

パワーコンディショナーは(PV1000, 安川電機(株))、10 kWの定格出力を持ち太陽光パネル60枚(出力11.7 kW)に対して1台設置した。発電データの収集は、太陽光発電データ計測表示システム((株)コンテック)を用い、1時間間隔で測定した。

3) ヒートポンプ

ヒートポンプによる電力量計測期間は、2009年6月1日から2010年5月31日まで行った。

空気熱源式ヒートポンプ(FDUP1402HM 改, 三菱重工空調システム(株))は、電気駆動で定格暖房能力14 kWのものを使用した(写真2-1)。ヒートポンプの暖房能力を、床面積 1000 m^2 のフェンロー型温室(温室表面積 1770.9 m^2)に表面積換算すると、 49.2 W m^{-2} 相当となる。ハイブリッド区の重油式温風暖房機(HK-2027, ネボン(株))は、暖房能力56.8 kW(熱出力64.6 kW, 効率88.0%)のものをを用いた。同様に床面積 1000 m^2 のフェンロー型温室に表面積換算すると、暖房能力は 199.4 W m^{-2} 相当となる。ヒートポンプの定格冷房能力は12.5 kWであり、床面積 1000 m^2 のフェンロー型温室へ表

面積換算すると、 34.9 W m^{-2} 相当となる。

温室の暖房温度設定は、ハイブリッド制御盤(NT-600, ネボン(株), 写真2-3)を用いて行った。暖房期間の設定温度は、時間帯別に18～22時は 22°C 、22～6時は 18°C 、6～18時は 20°C とした。

ヒートポンプによる夜間冷房は、2009年8月1日～9月15日に行った。夜間冷房の設定温度は、21～0時が 22°C 、0～7時を 20°C とした。

使用重油量および消費電力から換算した冷暖房費は、温室面積 1000 m^2 、温室表面積 1770.9 m^2 のフェンロー型温室に表面積の比率で換算した後、温室面積 1 m^2 当たりのシミュレーションの値として使用した。ヒートポンプおよび重油式温風暖房機の消費電力は、個々に交流電力モニタ(富士電機システムズ(株), PPMCFBR2-M)で測定した。

結 果

1) 発電量計測時とハイブリッドシステム消費電力計測時の天候

発電量計測とハイブリッドシステムの消費電力計測は異なる年月で実施した。それぞれの計測時の国土交通省気象庁の静岡県御前崎市観測結果を(2009年, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s1.php?prec_no=50&block_no=47655&year=2009&month=&day=&view=, 2010年, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s1.php?prec_no=50&block_no=47655&year=2010&month=&day=&view=, 2011年, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s1.php?prec_no=50&block_no=47655&year=2011&month=11&day=&view=, 2012年, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s1.php?prec_no=50&block_no=47655&year=2012&month=11&day=&view=, 平年値, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=50&block_no=47655&year=2010&month=&day=&view=, 平成26年4月28日参照), 表6-1, 図6-2, 図6-3に示した。

静岡県御前崎市における年間日照時間の平年値は、2231時間である。太陽光パネルによる発電量計測時の年間日照時間は2345時間で平年値よりもやや大きな値であった(表6-1)。特に7～10月の日照時間は長く、平年値よりも最も大きかった9月の日照時間は、平年値の130%であった(表6-1, 図6-1)。

表6-1 太陽光発電計測時とハイブリッドシステム消費電力計測時の御前崎市の日照時間・平均気温(気象庁観測値)^z

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間 ^y
日照時間	発電量計測時 ^x	206.4	159.7	184.3	196.8	208.2	129.7	206.8	272.2	218.2	205.2	151.4	205.6	2345
	消費電力計測時 ^w	227.2	137.5	166.6	147.0	214.5	129.1	101.0	227.6	192.6	168.6	142.5	171.7	2026
	平年値	199.4	183.9	186.7	196.0	197.0	149.1	185.3	234.9	167.6	164.8	168.4	197.4	2231
日平均気温	発電量計測時	6.0	6.4	10.1	14.3	18.6	21.4	25.1	27.3	25.3	20.3	15.9	8.6	16.6
	消費電力計測時 ^w	6.5	8.2	10.5	13.6	17.9	21.4	24.3	25.9	23.5	19.3	15.0	9.7	16.3
	平年値	6.7	7.1	10.1	14.6	18.3	21.3	24.8	26.5	24.1	19.4	14.4	9.2	16.4

^z 国土交通省気象庁ホームページ過去の気象データより^y 日照時間は合計値, 日平均気温は平均値.^x 2011年11月～2012年10月の観測値^w 2009年6月～2010年5月の観測値表6-2 静岡県御前崎市における太陽光パネル傾斜角の違いによる発電量^z 単位:kWh kW⁻¹

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
傾斜角 32.5°	117.2	105.6	118.7	124.0	128.6	103.2	120.4	146.4	126.2	121.5	89.0	107.6	1,408.5
10.0°	89.3	84.5	102.7	118.2	135.0	111.2	128.8	143.3	107.7	94.8	70.8	79.0	1,265.3

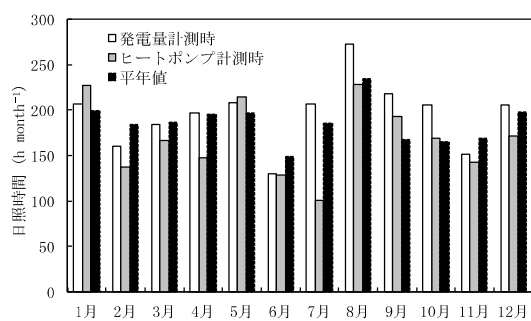
^z 2011年11月1日から2012年10月30日

図 6-1 発電量および消費電力計測時の御前崎市の月合計日照時間

発電量は2011年11月～2012年10月、ハイブリッドシステム消費電力は2009年6月～2010年5月に計測した。

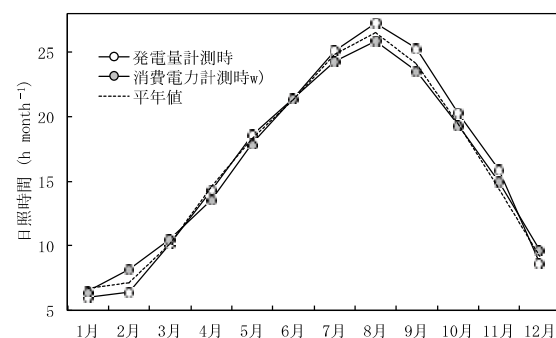


図 6-2 発電量および消費電力計測時の御前崎市の月合計日照時間

発電量は2011年11月～2012年10月、ハイブリッドシステム消費電力は2009年6月～2010年5月に計測した。

ハイブリッドシステム消費電力量計測時の日照時間は、平年値よりも低い値であり、年間の日照時間は2026時間で、平年値の91%であった(表6-1)。消費電力計測時の7月の日照時

間は特に短く、平年値の55%であった(表6-1, 図6-1, 図6-2)。

ハイブリッドシステムの消費電力に影響を与える日平均気温は、16.3℃で平年値の16.4℃よりも0.1℃低かった。発電量計測時の日平均気温は16.6℃で、平年値よりも0.2℃高かった(表6-1)。

2) 天候と発電量

太陽光発電は刻々と変わる天候に大きく左右される。傾斜角32.5°の太陽光パネルの1日の発電量推移の例を示すと(図6-3)、2012年4月12日の晴天日は6.6 kWh kW⁻¹の発電量であったが、4月14日の雨天日は1.2 kWh kW⁻¹で、晴れの日は雨天の日の約5.5倍の発電量であった。

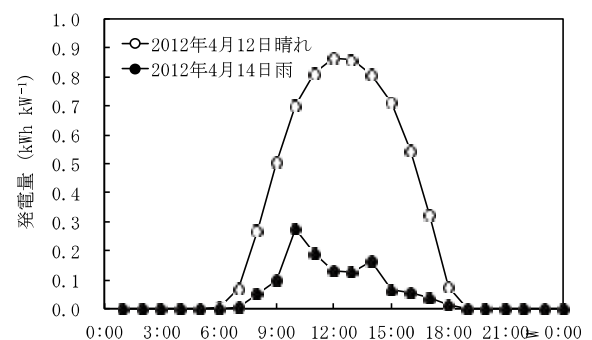


図 6-3 天候の違いによる太陽光パネルの発電量(パネル傾斜角 32.5°)

太陽光発電量を計測した一年間の一日毎の発電量の推移を見ると(図6-4)、天候により発電量は大きく左右されており、安定した電力の供給はできなかった。年間の発電量の推移では3月から5月の発電量が多かった。また、6月の梅雨時や2月の悪天候の影響で発電量が少なかった。

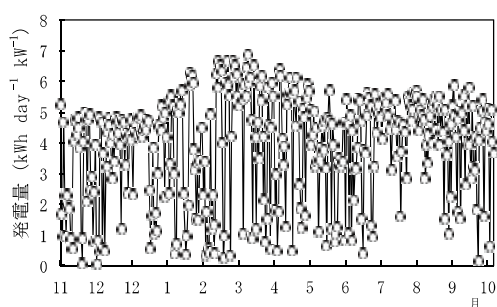


図 6-4 天候の違いによる太陽光パネルの発電量 (パネル傾斜角 32.5°)

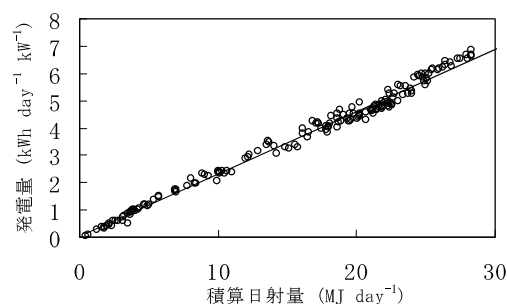


図 6-5 積算日射量と太陽光パネル発電量との関係 (パネル傾斜角 32.3°)

太陽光パネルに設置した 1 日の積算日射量と、太陽光パネルによる 1 日の発電量は下記の式で表すことができ、相関係数 $r=0.99$ と非常に高い値であった(図 6-5)。

$$E=0.2289P+0.0225 \quad \text{Eq. (6-1)}$$

E : 発電量 (kWh day⁻¹ kW⁻¹), P : 積算日射量 (MJ day⁻¹)

3) 発電量の月別時刻別推移

時刻別発電量の月ごとの平均値を求めた(図 6-6～6-9)。

2012 年 1 月から 3 月までのピーク時の発電量は、1 月が最も高かった。6 月は雨天が多く、日照時間が少なかったため(表 5-1)、日中の発電量は少なかった(図 6-7)。8 月の日照時間は平年値よりも高かったため(表 6-1)、日中の発電量は多かった(図 6-8)。11 月の日中の発電量も、日照不足により低い値であった(表 6-1、図 6-9)。

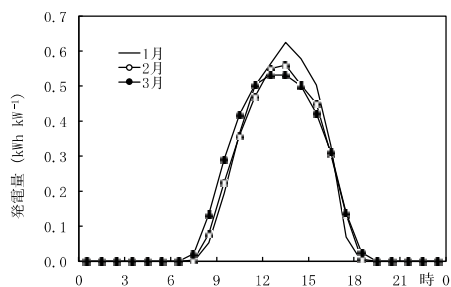


図 6-6 太陽光発電の時刻別月別平均値 (パネル傾斜角 32.5° 2012 年 1～3 月)

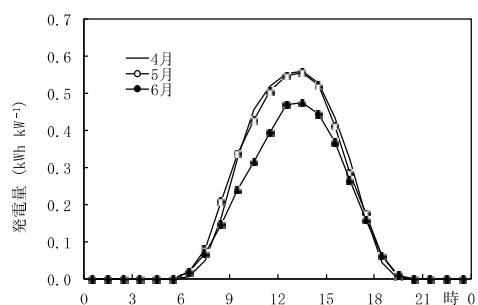


図 6-7 太陽光発電の時刻別月別平均値(パネル傾斜角 32.5° 2012 年 4～6 月)

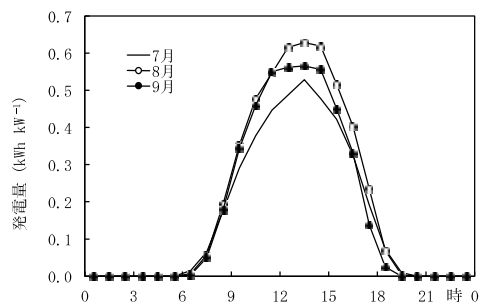


図 6-8 太陽光発電の時刻別月別平均値(パネル傾斜角 32.5° 2012 年 7～9 月)

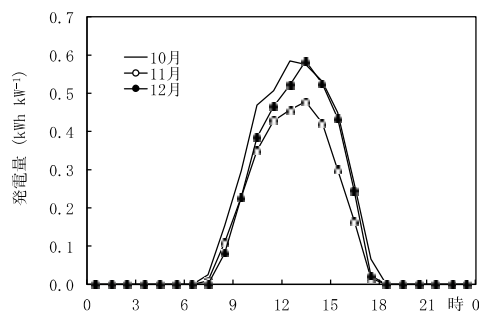


図 6-9 太陽光発電の時刻別月別平均値(パネル傾斜角 32.5° 2012 年 10 月, 2011 年 11～12 月)

4) 発電量の月別推移

傾斜角 32.5° と 10° の 2 つの太陽光パネル傾斜角の、静岡県御前崎市における 2011 年 11 月 1 日から 2012 年 10 月 31 日までの発電量を、表 6-2 および図 6-10 に示した。発電量はいずれの角度においても 8 月が最も多かった。9 月から 4 月の太陽高度が低い月では、傾斜角 32.5° の発電量が多かったが、5 月から 7 月の太陽高度が高い月では傾斜角 10° の発電量が多かった。年間の発電量は、傾斜角 32.5° が 1408.5 kWh kW⁻¹ であるのに対して、傾斜角 10° は 1265.3 kWh kW⁻¹ と約 10% 低かった(表 6-2)。

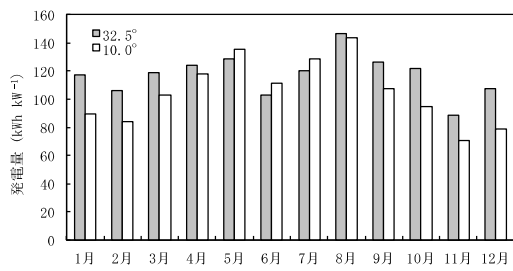


図 6-10 静岡県御前崎市における傾斜角の違いによる月別太陽光発電量(パネル傾斜角 32.5°, 10.0° 測定期間 2011 年 10 月～2012 年 11 月)

5) ハイブリッドシステム消費電力の時刻別推移

夏季夜間冷房期間中のヒートポンプの消費電力を、図 6-11 に示した。ヒートポンプ移動設定時刻の 21 時から翌朝 7 時まで消費電力があり、日中は移動しないため消費電力はなくなる。冷房稼働中ヒートポンプは連続運転していた。

暖房期間中の 12 月のヒートポンプ稼働中の消費電力実測値を図 6-12 に示した。日中は稼働しないため電力の消費が無いが、温度低下に伴い暖房運転で稼働する。約 45 分に 1 回消費電力が低下する減少が見られるが(図 6-12)、これはヒートポンプ室外機の除霜を行っているためである。

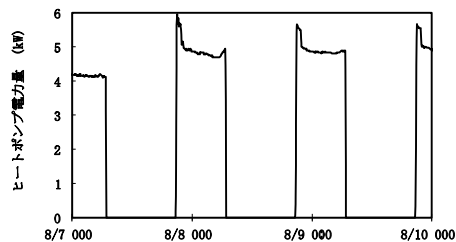


図 6-11 ヒートポンプ消費電力実測データ(2009 年 8 月 7～9 日)

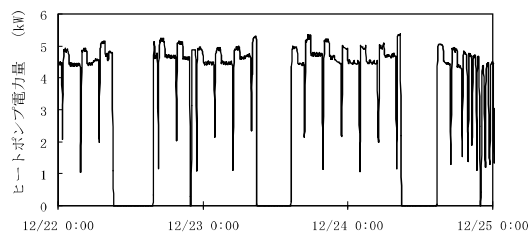


図 6-12 ヒートポンプ消費電力実測データ(2009 年 12 月 22～24 日)

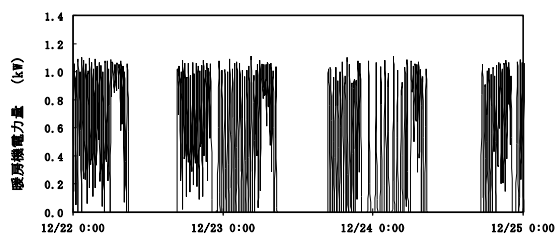


図 6-13 重油式温風暖房機消費電力実測データ(2009 年 12 月 22～24 日)

同一月日の暖房期間中の重油式温風暖房機の消費電力を図 6-13 に示した。消費電力はヒートポンプよりも少なく、ヒートポンプによる熱量が不足している時に稼働するため、頻繁にオンオフを繰り返していた。

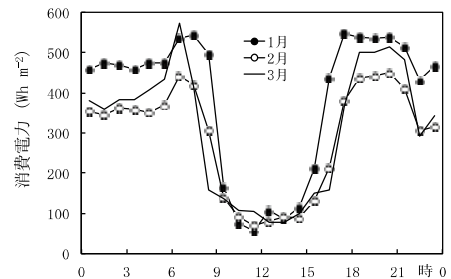


図 6-14 ハイブリッドシステム消費電力の時刻別月別平均値(2010 年 1～3 月)

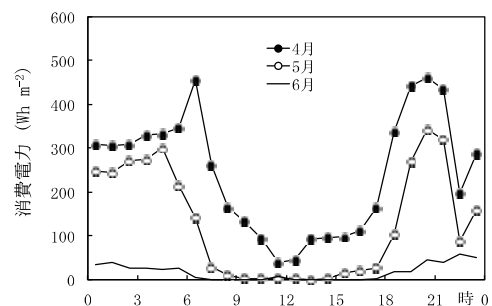


図 6-15 ハイブリッドシステム消費電力の時刻別月別平均値(2010 年 4～5 月, 2009 年 6 月)

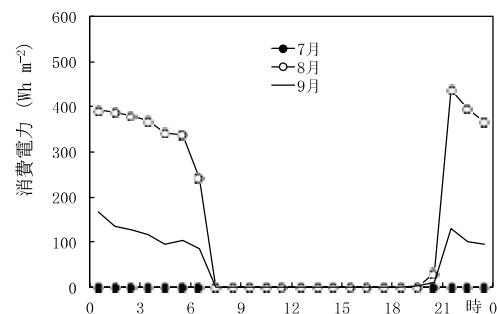


図 6-16 ハイブリッドシステム消費電力の時刻別月別平均値(2009 年 7～9 月)

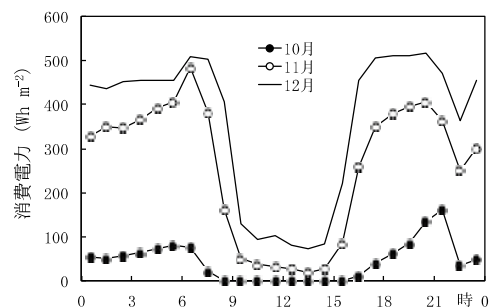


図 6-17 ハイブリッドシステム消費電力の時刻別月別平均値(2009 年 10～12 月)

これらの実測値を一般化するために、月ごとに時間帯別に平均値を求めた。ハイブリッドシステムにおけるヒートポンプと温風暖房機の1ヶ月の合計値の時刻別推移を図6-14から図6-17に示した。5~10月の期間は、日中暖房機とヒートポンプによる冷房も稼働しないので、日中の消費電力はほぼゼロであった。冬季は暖房のため、ヒートポンプが稼働するので、消費電力が増加した。特に温度が低下する夜間の消費電力が多かった。8~9月の夜間冷房稼働中は、日中は窓の開閉のみで温度制御するので消費電力はほぼゼロであった。夜間はヒートポンプ稼働中21時から翌朝7時までの消費電力が増加した。夏季夜間冷房の消費電力は、冬季の夜間の消費電力と比較するとほぼ半分であった(図6-14~6-20)。

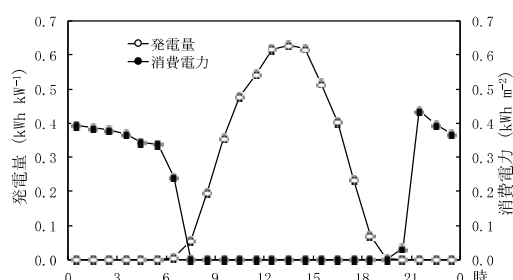


図 6-18 太陽光発電とハイブリッド消費システムの8月夜間冷房時の発電量と消費電力の時刻推移(太陽光発電2012年8月, パネル傾斜角 32.5° , 消費電力2009年8月測定)

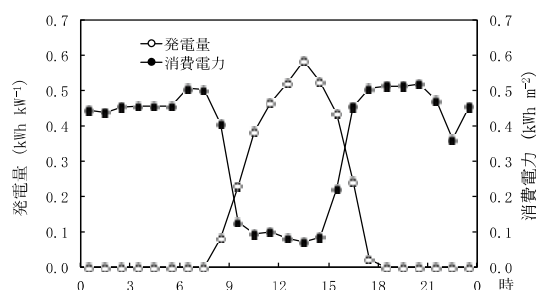


図 6-19 太陽光発電とハイブリッド消費システムの12月暖房時の発電量と消費電力の時刻推移(太陽光発電2011年12月, パネル傾斜角 32.5° , 消費電力2009年12月測定)

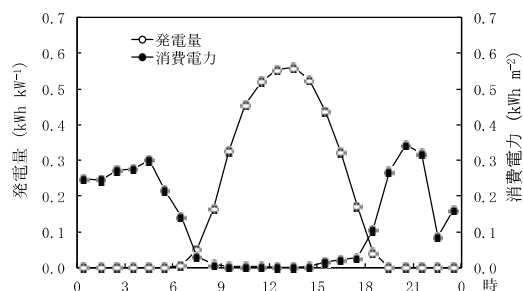


図 6-20 太陽光発電とハイブリッド消費システムの4月暖房時の発電量と消費電力の時刻推移(太陽光発電2012年4月, パネル傾斜角 32.5° , 消費電力2010年4月測定)

6) ハイブリッドシステム消費電力の月別推移

ハイブリッドシステムの年間の消費電力量は、ヒートポンプと重油式温風暖房機を合わせて、 13.66 MJ m^{-2} であった(表3-2)。暖房の稼働が多い11月から3月の消費電力が多く、最も消費電力が多かったのは1月で、 2.56 MJ m^{-2} であった。また、7月は冷暖房の稼働がないため消費電力は 0 MJ m^{-2} であった。8月1日から9月15日までヒートポンプによる夜間冷房を行ったため、消費電力が増加したが、消費電力が多かった12月と1月の、暖房時消費電力の約半分であった(表3-2)。

7) ハイブリッドシステムに直接利用可能な太陽光発電量

太陽光パネルによる発電と、ハイブリッドシステムによるバラ栽培温室の消費電力について、1ヶ月間の時刻別平均値の推移を図6-18から図6-20に示した。

夜間冷房を行った8月の、1ヶ月間の時刻別平均値を、図6-18に示した。日中はヒートポンプと重油式温風暖房機ともに稼働しないため、消費電力は無い。一方、太陽光発電は日中にのみ行われる。夜間冷房の時間帯の21時から翌朝7時は、ヒートポンプが稼働し消費電力が増加した。

暖房期間である12月の太陽光発電と、ハイブリッドシステム消費電力の1ヶ月間の時刻別平均値の推移を、図6-19に示した。夜間の消費電力は大きく 0.5 kWh m^{-2} であった。日中も暖房のためヒートポンプが稼働した。日中の消費電力は、月平均値でも 0.1 kWh m^{-2} と少なかった。

外気温が12月と比較して高くなった4月の発電量と、ハイブリッドシステムの消費電力の1ヶ月間の時刻別平均値を図6-20に示した。ヒートポンプは12月と同様に暖房のみに使用されているが、外気温の平均値が12月は 9.2°C であるのに対し、4月の外気温の平均値は 14.6°C と高かったため(表6-1)、ハイブリッドシステムの消費電力は夜間でも 0.3 kWh m^{-2} 程度であった。外気温が上昇していたため、日中の消費電力はほぼゼロに近い値であった(図6-20)。

1年間の太陽光発電と、ハイブリッドシステムの消費電力の、時間帯別の合計値を表6-3に示した。太陽光発電の年間の発電量は、傾斜角 32.5° で 1408 kWh kW^{-1} 、傾斜角 10° においては 1265 kWh kW^{-1} であった(表6-3)。いずれの傾斜角でも7時から17時の間の発電量は、全発電量の96%であった。ハイブリッドシステムの消費電力は、年間 53.75 kWh m^{-2} であった(表6-3)。太陽光発電において96%の発電時間帯である、7時から17時の間の消費電力は、年間を通したハイブリッドシステムの全消費電力の18%であった。

8) 年間の太陽光発電量と消費電力量

月別の太陽光発電による発電量と、ハイブリッドシステムの消費電力を図6-22に示した。今回のハイブリッドシステムは、7月に冷房運転を行わなかったため消費電力がゼロであった。季節別の太陽光発電量と消費電力のバランスを見ると(図

6-21)、冬季は発電量に対してハイブリッドシステムの消費電力が大きく、夏季は太陽光発電量が消費電力よりも大きくなる傾向であった。

表6-3 ハイブリッドシステム消費電力と太陽光発電の時間別年合計値

	ハイブリッドシステム消費電力 ² kWh m ⁻²	太陽光発電量 ²	
		傾斜角32.5° kWh kW ⁻¹	傾斜角10° kWh kW ⁻¹
0時	3.17	0	0
1時	3.13	0	0
2時	3.19	0	0
3時	3.20	0	0
4時	3.25	0	0
5時	3.26	0	0
6時	3.55	2	3
7時	2.58	13	18
8時	1.70	51	52
9時	0.76	102	94
10時	0.50	148	128
11時	0.41	178	156
12時	0.42	196	177
13時	0.44	204	186
14時	0.51	189	170
15時	0.91	158	138
16時	1.67	108	91
17時	2.39	46	41
18時	2.89	11	11
19時	3.20	1	1
20時	3.46	0	0
21時	3.76	0	0
22時	2.52	0	0
23時	2.89	0	0
合計	53.75	1408	1265
7～17時	9.90	1348	1209
	18%	96%	96%

¹ ヒートポンプの暖房時定格能力は49.2 W m⁻²、暖房機の能力は199.4 W m⁻²

計測は2009年6月～2010年5月、静岡県磐田市農林技術研究所で測定。

² 2011年11月1日から2012年10月30日静岡県御前崎市で測定。

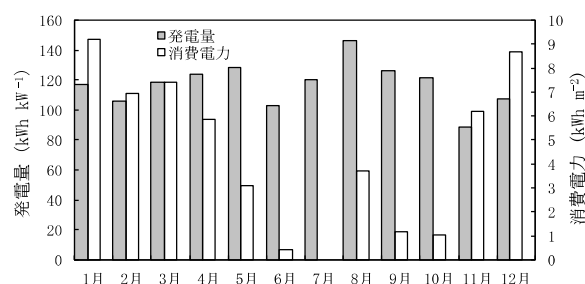


図 6-21 月別太陽光発電量とヒートポンプハイブリッドシステムの消費電力

(パネル傾斜角 32.5° 測定期間 2011 年 10 月～2012 年 11 月、ヒートポンプの暖房時定格能力 49.2 W m⁻²、暖房機の能力 199.4 W m⁻²、2009 年 6 月～2010 年 5 月、静岡県磐田市農林技術研究所で測定)

静岡県磐田市における 2009 年 6 月から 2010 年 5 月の間のヒートポンプ(暖房時定格能力 49.2 W m⁻²)と重油式温風暖房機(暖房能力 199.4 W m⁻²)による、ハイブリッドシステムの 1 年間の消費電力量は、53.75 kWh m⁻² であった(表 6-3)。1 年間の太陽光発電量は、傾斜角 32.5° で 1408 kWh kW⁻¹、傾斜角 10° においては 1265 kWh kW⁻¹ であった(表 6-3)。これらの値から、今回測定したバラ栽培温室ハイブリッドシステムの、1 年間の消費電力に相当する電力を発電するためには、傾斜角 32.5° の太陽光パネルでは、温室 1 m² 当たり 0.0382 kW の能力の太陽光パネルが必要であった。また、傾斜角 10° では、温室 1 m² 当たり 0.0425 kW の能力の太陽光パネルが必要であった。

考 察

1) 発電量計測時とハイブリッドシステム消費電力計測時の天候

太陽光発電の発電量と、バラ栽培温室におけるハイブリッドシステムの消費電力の測定は、異なる年月に行った。発電量と消費電力は同時に計測することが望ましいが、天候は変動するため発電量、消費電力共に、毎年異なる値となる。今回の目的は、年間を通して大まかな傾向を把握することであり、測定年月が異なっても発電と消費電力の傾向はある程度把握できるものと考えた。

太陽光発電計測時の静岡県御前崎市における、一年間の日照時間は 2344.5 時間であり、平年値の 2230.5 時間よりも 5% ほど長かった(表 6-1)。特に 7～10 月の日照時間は多く、9 月は平年値より 30% も多かった。しかし、年間の日照時間の差は 5% であり、測定結果が著しく日照時間が長い条件で行ったわけではなく、太陽光発電測定時における年間日照時間は、平年値とほぼ同様と判断した。

気温は、温室の冷暖房の目的で稼動するハイブリッドシステムの消費電力に、大きく影響を与える。消費電力測定時の 11～12 月の日平均気温は、平年値と比較すると 0.5℃ 以上高かった。また、2 月の日平均気温は 1.1℃ 高かった。しかし、年間の平均気温は、ハイブリッドシステム消費電力測定時が 16.3℃ で、平年値よりも 0.1℃ 高いだけで、平年値とほぼ同等であった。

今回の太陽光パネル発電量、およびハイブリッドシステム消費電力は、1 年間の実測値に基づいており、年による天候の変動は避けられない要因である。両者の比較で、電力の需要供給の傾向がある程度判別できれば十分と考えられる。

2) 天候と発電量

太陽光発電は、天候により大きく影響を受ける。晴天日と雨天日の比較をした一例でも(図 6-3)、雨の日の発電量は晴天日の 5 分の 1 以下であった。年間を通した毎日の発電量も、天候により大きく影響を受けると共に、季節による発電量の変動も大きかった(図 6-4)。太陽光発電量は、当然ながら戸外の積算日射量に比例した(図 6-5)。

今回の傾斜角 32.5° の計測結果では、一日の発電量では、3 月の快晴日が最も高い値であった(図 6-4)。天候不順による影響も大きく、2 月と 5～6 月において発電量が少ない日が多かった。

3) 発電量の月別時刻別推移

毎日の天候変動の影響を一般化するために、傾斜角 32.5° の太陽光パネルの月ごとの時刻別の発電量の平均値を求め、季節の変動を検討した(図 6-6～6-9)。

発電の時間帯は、日の出日の入り時刻の影響を受けるが、時間帯別の平均値にすると大きな差ではなかった。日中の発電量は、天候の影響を大きく受けるため、6月の日照時間平年値149.1時間(表6-1)に比較して、129.7時間と少なかった。6月発電量は、低い値であった(図6-7)。また、日照時間が272.2時間(表6-1)と平年値の234.9時間と比較して多かった8月は、日中のピークの時間帯の発電量が高い値であった(図6-8)。

太陽光発電は年間を通して9時から16時までを中心に行われ、天候の不順な梅雨期や秋雨時は発電量も少なくなった。

4) 発電量の月別推移

発電量の月別推移では、傾斜角 32.5° と 10° の2つの太陽光パネル傾斜角では、いずれの角度においても5月が最も多かった(表6-2, 図6-10)。年間の発電量は、傾斜角 32.5° の太陽光パネルが $1408.5 \text{ kWh kW}^{-1}$ であるのに対して、傾斜角 10° では $1265.3 \text{ kWh kW}^{-1}$ と約10%低かった(表6-2, 図6-10)。

冬季に消費電力が多いハイブリッドシステムへの利用においては(図6-21)、静岡県御前崎市においては傾斜角 32.5° が有利と思われる。しかしながら、傾斜角が大きくなると強風の影響を受けやすくなるため、支持構造物の強度が求められ、設置費用が高くなる。設置費用と、発電量のコスト計算を行い、有利となるほうを選択するのが望ましい。

発電量と太陽光パネルの設置費のコスト比較のため、仮に太陽光パネルで発電した電力を、全量売電した場合でコストを比較する。平成26年度の太陽光発電10 kW以上の買い取り価格は、20年間固定で税抜き32円である(再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/data/kaitori/kaitori_jigyousha2013.pdf, 2014年5月26日参照)。10 kWの太陽光パネルで、表6-2から20年間の発電量に、買い取り価格を掛けた場合は、売電総額は傾斜角 32.5° では約900万円となり、傾斜角 10° では約810万円となる。太陽光発電システムのパワーコンディショナーのメンテナンス費用などは無視しているが、当初の建設費がこの差額の範囲内であれば、太陽光発電最適角度である 32.5° を選択した方が有利となる。太陽光パネルの設置には、土質や風の強さなどが大きく影響を与えるため、それぞれの条件での確認が必要となる。

5) ハイブリッドシステム消費電力の時刻別推移

バラ栽培温室における夏季夜間冷房時の、ハイブリッドシステムの消費電力の実測値の推移は、ヒートポンプ稼働時に連続的に電力消費がある(図6-11)。一方ヒートポンプ暖房時の消費電力は、一定時間ごとに(今回使用したヒートポンプでは45分間隔)、消費電力が低下する(図6-12)。これは外気温が約 8°C 以下になると、室外機の熱交換器に霜が付着し、熱効率が低下するのを防止するための、除霜運転となるからである。

除霜運転中は、温室内の暖房は不可能となる。そのためにもヒートポンプのみによる暖房ではなく、ハイブリッドシステムが望ましい。

6) ハイブリッドシステム消費電力の月別推移

バラ栽培温室におけるハイブリッドシステムの、年間を通じた月別消費電力は、夏季よりも冬季において大きな値であった(表3-2)。夏季のハイブリッドシステムは、夜間の限られた時間帯の冷房にのみ稼働するのに対して、冬季は温室内を 18°C 以上に保つための稼働時間が長くなるためである。今回の設定では、冬季の消費電力は、8月の夜間冷房実施月の、約2倍の消費電力であった。

ハイブリッドシステムの、月別時間帯別の消費電力では(図6-14~6-17)、5~10月の期間は、日中重油式温風暖房機もヒートポンプによる冷房も稼働しないので、日中の消費電力はほぼゼロであった。太陽光発電量が最も多くなる日中にヒートポンプは稼働せず、太陽光発電の電力を、ヒートポンプが直接利用できない状態であった。

冬季は温度の低下に伴い、特に夜間の消費電力が多かったが、日中でも 18°C を低下する時もあり、太陽光発電の電力が直接利用できる場合もある(図6-14~6-17, 6-2019)。

7) ハイブリッドシステムに直接利用可能な太陽光発電量

ハイブリッドシステムの使用電力に、直接利用可能な太陽光発電量を検討した(図6-18~6-20)。8月の発電量と消費電力の測定値では、太陽光発電が行われている日中はほとんど電力の消費が無い(図6-18)。8月のヒートポンプ利用は夜間冷房だけであるので、太陽光発電による電力は、ほとんど直接利用できない。

同様に、比較的気温が高くなった4月においても、日中はヒートポンプによる暖房が稼働しないため、日中の消費電力は極わずかである(図6-20)。

12月の厳寒期においては、日中の気温が低いので、ヒートポンプによる暖房が稼働し、太陽光発電の電力が直接利用できる(図6-19)。

太陽光発電量と、ハイブリッドシステムの消費電力の、年間を通しての時刻別の平均値を求めると(表6-3)、7時から17時までの年間合計太陽光発電量は、総発電量の98%を占めた。一方、ハイブリッドシステムの時刻別消費電力の合計値では、7時から17時までの年間合計消費電力は、全消費電力の18%であった。仮に7時から17時までの時間帯における消費電力を、全てまかなう能力を持つ太陽光発電を設置した場合は、ハイブリッドシステムの全消費電力の18%の消費電力を供給することができる。

また、今回消費電力は調査しなかったが、循環扇や窓の開閉用モータ等の日中の稼働は、太陽光発電の電力が直接利用できる。

8) 年間の太陽光発電量と消費電力量

季節別の太陽光発電量と消費電力のバランスを見ると(図 6-21), 冬季は発電量に対してハイブリッドシステムの消費電力が大きく, 夏季は太陽光発電量が消費電力よりも大きくなる傾向であった。季節による変動からも, 太陽光発電による電力を, 直接ハイブリッドシステムで使用するには大きな問題がある。

年間を通して, 太陽光発電による発電量と, 静岡県バラ栽培におけるハイブリッドシステムによる消費電力を比較すると(図 6-21), 太陽光パネルの傾斜角 32.5° では, ハイブリッドシステムの年間の消費電力に相当する電力を発電するためには, 温室 1 m^2 当たり 0.0382 kW の能力の太陽光パネルが必要であった。また, 傾斜角 10° ではハイブリッドシステムの年間の消費電力に相当する電力を発電するためには, 温室 1 m^2 当たり 0.0425 kW の能力の太陽光パネルが必要であった。

しかしながら, 天候により大きく発電量が左右される太陽光発電の特徴や, 発電量とハイブリッドシステム消費電力の, 時間的および季節的な不一致のため, 太陽光発電による電力を, 直接ハイブリッドシステムに使用することは困難である。

太陽光発電をハイブリッドシステムの電源として利用するためには, 太陽光発電の売電と, 2 次電池の利用の 2 点が考えられる。

太陽光発電の売電については, 2012 年 7 月から再生可能エネルギー固定価格買取制度が導入されてから安定して長期間高価格で売電が可能となった(再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック, http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/data/kaitori/kaitori_jigyousha2013.pdf, 2014 年 5 月 26 日参照)。温室の冷暖房のため, ハイブリッドシステムが使用する電力は, 電力会社から購入し, 太陽光発電の電力は売電するが, 施設園芸用に消費する電力を再生可能エネルギーで賄うことができる。太陽光発電による電力を, ハイブリッドシステムの消費電力に, 直接使用はできないが, 消費電力に見合う太陽光発電は可能であり, トータルとして施設園芸への再生可能エネルギー利用につながる。

また, 太陽光発電と 2 次電池を組み合わせることで, 施設園芸への再生可能エネルギーが利用できる。

「NEDO 二次電池技術開発ロードマップ 2013 (Battery RM2013)」(<http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>, 2014 年 5 月 28 日参照)によると, 定置用 2 次電池ロードマップ工場・ビル用の現在の価格は, 2012 年の時点で $5 \sim 60 \text{ 万円 kWh}^{-1}$ である。

太陽光発電とヒートポンプハイブリッドシステム消費電力の関係から(図 6-18~21), 晴天日が続くと仮定し, 1 日分の消費電力を蓄電できれば, 太陽光発電による電力で, 夜間のヒートポンプハイブリッドシステムの消費電力をまかなうこと

ができる。

最も消費電力が多かった 1 月の温室の日平均消費電力は 297 Wh m^{-2} であり, 日本における一般的なハウス面積の基準である 1000 m^2 に換算すると, $297 \text{ kWh } 1000 \text{ m}^2$ のバッテリー容量が必要となる。NEDO 二次電池技術開発ロードマップ 2013 における, 定置用 2 次電池の最も低い価格である 5 万円 kWh^{-1} で試算すると, 1000 m^2 のバラ栽培温室に, 必要最低限の 2 次電池の価格は 1485 万円となる。この価格は晴天が常に連続するという前提の価格であり, 雨天が 1 日ある場合はその倍の蓄電量が必要となり, 2 次電池の価格も 2 倍となり, 2 次電池を組み込んだ太陽光発電を施設園芸に利用することは, 現時点ではイニシャルコストの面からも困難である。ただし, Leaf to Home (<http://ev.nissan.co.jp/LEAF/TOHOME/>, 平成 26 年 5 月 28 日参照)のように, 電気自動車 household 用電源として使用するシステムも販売されており, 今後の 2 次電池価格の低下によっては, 施設園芸に導入される可能性もある。

第Ⅶ章 総合考察

ハイブリッドシステムの有利性

1) 暖房

ハイブリッド冷暖房システムは、慣行の重油式暖房機と比較すると、投入エネルギーは約46%削減でき、試験時における2009~2010年時の平均重油価格65.8円/L¹、電気料金の比較では、ヒートポンプによる夏季夜間冷房の電気料金を加えても、年間の冷暖房費が約24%削減できた(表3-3)。

これらの効果は、石油価格と電気料金のバランスによるものと、ヒートポンプの熱効率の高さによるものである。今回使用したヒートポンプの、暖房定格条件下のCOPは3.79である。この値は電気エネルギー1に対して3.79倍の熱エネルギーが得られることであり、低温側から高温側に熱を汲み上げる装置であるヒートポンプの有利な点である(林, 2009)。但し、現状では温室の暖房をすべてヒートポンプで賄うことは得策ではない(川嶋ら, 2008)。外気温が低くなると、ヒートポンプの暖房効率が低下するとともに、室外機の除霜運転のため一時的に室内の暖房が止まることがその理由の一つである。また、温室の暖房をすべて電気式のヒートポンプで賄おうとすると、現状の電気料金では契約電気容量が大きくなり、年間一律で徴収される基本料金の負担が増加するために、経営的には不利な条件となる。現実的には、本研究で実施したように、暖房はヒートポンプを優先的に用い、ヒートポンプの能力だけでは暖房が不足するようになった時には、慣行の重油式温風暖房機で補足的に暖房するハイブリッドシステムが有利である。

ヒートポンプによるハイブリッドシステムを導入する上で、もう1つのメリットは、同一の暖房条件でもCO₂発生量が削減できることである。本研究で測定した慣行の重油式温風暖房機の年間CO₂排出量が、92.5 kg/m²であるのに対して、ハイブリッドシステムでは56.6 kg/m²で、年間のCO₂排出量は約39%削減できた(図3-7)。1997年に京都で開催された気候変動枠組条約の第3回締約国会議(Conference of the Parties, COP3)において、温室効果ガスの削減目標を定める「京都議定書」が採択されCO₂の排出量削減目標が定められた。

平成21(2009)年度における、我が国の温室効果ガス総排出量(12億900万t-CO₂)に占める農林水産業・食品製造業の割合は、4%(5100万t-CO₂)と極わずかであるが(平成23年度食料・農業・農村白書, http://www.maff.go.jp/j/wpa_per/w_maff/h23/pdf/z_1_3_7.pdf, 2014年10月14日参照)、ハイブリッドシステムは環境負荷が少なく、地球温暖化防止

に農業面から貢献できる冷暖房システムといえる。

2) 夜間冷房

ヒートポンプは、暖房だけでなく、温室の夜間冷房装置としても使用できる。地球温暖化などで農作物に対しては、夏季の高温対策の必要性が望まれており、農林水産省でも平成21年度に生産環境総合対策事業実施要綱を制定し、地球温暖化対策の強化をあげている(http://www.maff.go.jp/j/seisan/kan_kyo/ondanka/pdf/jissiryokou.pdf, 2013年12月31日参照)。ヒートポンプによる夜間冷房は、温暖化対策としても期待できる。林(2001)は、ヒートポンプによる冷房は日中日射による温度上昇が大きくコストに見合わないが、夜間であれば日射負荷が少ないために冷房が可能であるとしている。

今回の試験に用いたハイブリッドシステムのヒートポンプ(定格暖房能力49.2 W/m²)では、暖房費が24%削減でき、18℃のバラの暖房用に適切な能力であった(表3-3)。冬季暖房用に設置したヒートポンプを用いて夜間冷房することで、夏季のバラの切り花総重量の増加(表4-3)および階級別発生率の向上により(表4-4, 図4-7)、バラの売上高が向上した(表4-5)。

夜間冷房を行った、8、9月の2ヶ月におけるヒートポンプの電気料金は、84円/m²であり、ハイブリッドシステムの年間冷暖房費の5%程度と少なかった(表3-3, 図4-6)。このことは、暖房費削減のためのヒートポンプの導入で、新たな投資をしなくても夏季の夜間冷房が可能になり、ヒートポンプの年間利用の有利性を示している。

3) 除湿

馬場(2009)は、ヒートポンプの除湿利用として、送風除湿、暖房除湿、冷房除湿の3つの除湿方法があると記述している。送風除湿は、送風により作物群落内に気流を起こし、温度ムラや湿度ムラを発生しないようにし、その結果作物群落内は除湿できる方法で、ヒートポンプの場合には送風機の稼働だけで可能である。暖房除湿は、暖房モードでヒートポンプを稼働することで温度を上昇させ、相対湿度を低下させる除湿方法で、一般的な暖房機による除湿と同様である。冷房除湿は、ヒートポンプを冷房モードで稼働することで、室内機蒸発器表面に大量の結露が発生し、空気中の湿度を除去する方法である。

温室内に設置してあるヒートポンプの蒸発器表面は、ヒートポンプによる冷房時に、温室内の気温よりも低下するため結露する(林, 2009)。バラ栽培温室内の7~9月の夜間(18:00~8:00)の平均相対湿度は、90%以上であった(図3-3, 表4-1)。ヒートポンプによる温室内の夏季夜間冷房は、温室内の相対湿度が高く室内機は除湿を伴う条件となっている。本研究で

用いた冷房能力 34.9 W m^{-2} のヒートポンプ夜間冷房時において、熱交換器への結露による除湿量は、 11.7 L h^{-1} であった(表 5-5)。この除湿により、温室内の相対湿度および絶対湿度が低下し、飽差が大きくなった(図 5-5, 図 5-6, 図 5-7)。

温室内の除湿が目的の場合で、ヒートポンプによる冷房のみでは温度が低下しすぎる場合は、暖房機を併用して使用することで、温度を維持したままの適切な除湿が可能となる(図 2-1)。今回の試験では、暖房と冷房を同時に行う除湿は行わなかったが、ハイブリッド制御盤は、暖房と冷房を同時に行う事で積極的に除湿をする制御方法が可能であり(馬場, 2009)、ハイブリッドシステムは、暖房、冷房、除湿と、従来はそれぞれの目的ごとに装置を設置しなければならなかった温室の環境制御を、既存の暖房機とヒートポンプとハイブリッド制御盤を設置することで可能になり、省エネルギー、低コストになるだけでなく、作物栽培に最適な栽培環境に制御できる新しいシステムである。

バラ栽培におけるハイブリッドシステム

1) 暖房

バラは世界で最も重要な花きであり、流行色を常に取り入れ、花き生産国の中で常に上位を占めている品目である(Hamrick, 2003)。日本での切花生産も古く、1917 年頃から大阪で栽培され、静岡県においても 1935 年ころには 10000 m^2 と、全国の約 3 割の栽培面積があり大きな産地であった(林勇, 1996)。

切花生産のためのバラの栽培適温は、日中が $23 \sim 25^\circ\text{C}$ 、夜間は $16 \sim 17^\circ\text{C}$ であり(林勇, 1998)、年間を通して栽培するバラ栽培においては暖房が不可欠である。日本におけるバラ栽培の暖房には、重油式温風暖房機が一般的に使用されている。しかしながら、緒言で述べたように重油価格は変動が大きく、重油価格の高騰はバラ栽培経営に大きな影響を与える。バラ栽培経営の安定のためにも、省エネルギーによる暖房費削減が極めて重要である。

水戸ら(1980)は、バラを用いて省エネルギーの目的で、夜温を前夜温と後夜温とに分ける定時変温方式で、前夜半を 15°C 、後夜半を 12.5°C にすると、バラの収量品質を落とさず燃料を 13% 節約できることを明らかにした。道園ら(2012b)は、スプレーグクを用い日没後の 20°C 昇温処理(EOD heating)と、その後の 13°C の低温管理は、 18°C 一定管理と開花時期は変わらず、燃料費は 15% 程度削減できることを明らかにし、アフリカンマリーゴールドでも同様の結果を得た(道園ら, 2012a)。これらのように、作物ごとに生産性を維持しつつ、省エネルギーにつながる温度管理方法の開発も消費燃料削減に有効である。

暖房を部分的に行う局部加温により、エネルギーを削減する方法もある。原ら(2010)は、バラの株元を 30°C に温める株元加温で、慣行の温室内最低夜温 18°C より 3°C 低い 15°C で夜温管理を行っても、同等の以上のバラの採花本数であることを報告している。河崎ら(2011)は、トマトの成長点付近を温風ダクトにより局部加温することで、燃料は約 26% 削減でき収穫果実の上物率も向上することを報告している。

バラ栽培温室における年間冷暖房用の電力料金及び重油料金を、2009~2010 年の電気料金、A 重油実勢価格 65.8 円 L^{-1} で冷暖房コストを比較した結果、年間の冷暖房費はハイブリッドシステムで、約 24 % (517 円 m^{-2}) の暖房費が削減された(表 3-3)。ハイブリッドシステムと、バラに最適の温度管理方法や、局所加温などの技術を組み合わせることにより、更なる低コスト・省エネルギーも可能となる。

大川はバラ栽培において(大川, 1997)、夜温が到花日数、茎長、切り花重、茎の太さ、茎の硬さ、花色などに影響を与え、高夜温は到花日数を短縮し切り花長は短く、茎は細く、切り花重は軽くなるとしている。記述のようにバラの品質に夜温は大きく影響を与えるが、暖房方法であるハイブリッドシステムは、従来の重油式暖房機と同様の夜温の管理ができるため、品質収量に関しては従来方式と同様の効果が期待できる。

また、ヒートポンプは慣行の石油燃焼式暖房機と比較して風量が少ないため、ヒートポンプのみの送風機では、温室内部が均一の温度にならない可能性が高い。今回の試験で明らかとなったように、温室内部に循環扇を適切な位置に配置することで、風速が適切な強さとなり温度の均一性が高まる。ヒートポンプの導入にあたっては、循環扇を合わせて設置することが望ましい。

2) 夜間冷房

ヒートポンプは、暖房だけでなく、温室における夏季の夜間冷房や、除湿にも利用できるメリットがある(小国, 1982; 林ら, 1983b)。前述のように切花生産のためのバラの日中の栽培適温は $23 \sim 25^\circ\text{C}$ であり(林勇, 1998)、夏季日中の温室内部は 30°C 以上と成育適温をはるかに越え、関東地方から西の暖地では、夏季はバラの切花品質が低下し減収する(藤田, 1999, 寺田ら, 1997a)。バラ栽培における夏季の高温対策としては、遮光が最も簡便な方法であり、細霧冷房もバラには有効であるとしている。冷房機などで日中の室温を下げる方法は、バラ栽培には有効ではあるが、コストが高くなり導入は困難である(酒井, 1996)。林(2001)は、ヒートポンプによる冷房は、夜間の利用であれば日射負荷が無いため、ある程度付加価値の高い作物では、経済的に見合う場合もあると報告している。森口ら(1990)は、バラ栽培での夏季高温期における夜間冷房と根圏冷却の効果を検討し、夜間冷房により切花本数が増加するとしている。

バラ栽培でハイブリッドシステムによる夜間冷房を8月1日から9月15日に実施した結果、8月の夜間平均気温(18時～8時)は、夜間冷房した場合で23.1℃、夜間冷房がない場合の夜間平均気温 25.3℃と比較して平均 2.2℃低下した(表3-2)。

バラ切り花の月別収穫本数は、9月にハイブリッド区で統計的に有意な差が多かった(表4-2)。また、8、9月の夜間冷房期間においては、切り花総重量、平均切り花重、平均切り花長が大きくなった(表4-3)。階級別発生率は、ハイブリッド区で上位階級発生本数が多く、夜間冷房の効果が見られた(図4-7)。

高夜温が切り花の到花日数を短縮し、その結果切り花長は短くなるなどの品質低下を起こすと大川(1997)が記述しているが、夜間冷房は温度を低下することで到花日数を長くし、その結果切り花長が長くなり階級別発生率が向上する効果が得られたと考えられる。

年間のバラの切り花本数の推移を図4-6に示したが、夜間冷房を行わなかった処理区では、9月の切り花本数は少なく、それまでに見られた収穫本数のピークがはっきりしない状態となった。このことは、夏季高温期においてバラの生育遅延や到花日数の短縮により収量が低下したことで、その後9月以降に収穫本数に一定の周期が見られなくなったと思われる。一方夜間冷房処理区では収穫のピークが8月以降もはっきりとしており(図4-6)、夏季の夜間冷房は、高温による生育不良・生育遅延を回避する効果があると推測した。

二村ら(2012)は、バラ栽培において夜間冷房と超微粒ミスト噴霧を組み合わせることで、20℃の夜間冷房処理よりも、日中の超微粒ミスト噴霧による4～5℃の温度効果と23℃の夜間冷房を組み合わせたほうが、切り花収量および品質が優れるだけでなく、約3割の省エネルギーになると報告している。

バラ栽培においては、決定的な夏季高温対策がなかったが、ハイブリッドシステムでは今まで困難であった夜間冷房が可能になり、夏季のバラの収量品質が向上する効果も今回の研究で明らかとなり、画期的な夏季高温対策方法といえる。また、日中温室内の温度低下に効果のある細霧冷房などと組み合わせることで、更に有効な夏季高温対策になるとと思われる。

3) 除湿

バラ切り花の日持ちは、栽培環境に影響される(小山ら、2009)。本村ら(2003)は、バラの栽培環境と切り花の日持ち性との関連を多変量解析し、バラ切り花の日持ち性は、栽培時の気温と湿度に影響され、高温高湿下で栽培した場合に特に悪く、低温あるいは低湿度下で栽培すると改善する傾向にあると報告している。佐藤ら(2005)は、栽培中の相対湿度がバラ切り花の品質日持ち等に及ぼす影響を調べ、高湿度下での栽培は、収量を増加させるものの、気孔の大型化と開閉機能

の低下をもたらす、蒸散過多による品質保持期間の短縮につながると報告している。これらの報告から、梅雨期や秋雨時期などの期間におけるヒートポンプを用いた除湿は、バラ切り花の日持ち性の向上につながり、品質向上に有効と推測され、ヒートポンプによる除湿の有効性が期待できる。

バラの主要な病害である、うどんこ病(*Sphaerotheca pannasa* (Waller. Ex.Fr.) Lévéille var. *rosae* Woronichin)・べと病(*Peronospora sparsa* Berkely)に関しても、湿度は大きく影響している。大川は(1999)、うどんこ病の防除法として環境条件を変えること、すなわち夜間の湿度を下げるのが最良の防除法であるとしている。べと病に関しても夜間の湿度を85%以下にすることが有効な防除対策であると記述している(大川, 1999)。

慣行重油暖房温室における日中の湿度の平均値は年間を通して80%以下であり、雨天日が連続すると問題となるが、平均値で見ると日中の湿度がバラの日持ち品質や病気の発生に及ぼす影響は少ないと推測される(図3-3, 表4-1)。慣行温室の夜間の相対湿度は、暖房機の稼働する11月から3月までは80%以下であったが、7月から9月の夜間平均湿度は90%以上であり(図3-3, 表4-1)、特にこの期間において夜間湿度が高くなり、バラの日持ち品質や病害の発生に悪影響を及ぼすと思われる。ハイブリッドシステムでは、夏季の夜間冷房により相対湿度を80%以下に維持できるため(図5-4)、日持ちの向上や病害発生予防に役立つ。

5月の夜間の戸外の平均気温は16.9℃で、18℃管理のバラ栽培では暖房が必要な月であり、夜間の温室内の平均湿度は約84%と高い(表4-1)。この時期には、暖房機の稼働も少なく湿度が高くなるが、ハイブリッドシステムは、従来の暖房除湿だけでなく、冷房機を同時に運転し適切な温度に維持しながらの除湿も可能であり、年間を通して温室内をバラ栽培に適した湿度環境に制御することができる。

バラ栽培へのハイブリッドシステムの導入は、除湿機能においても、切り花の日持ち向上など品質向上が期待できるだけでなく、幅広い季節においてバラの病気の発生予防にも有効に利用できるため、極めてバラ栽培に適したシステムといえる。

4) 温室内の飽差とバラの蒸散

作物の蒸散は、日射量、気温、飽差、土壌水分などの環境条件により影響を受ける。内藤はダイズの蒸散量と、気温・飽差・日射量・蒸発計蒸発量および葉面積指数(LAI)との関係を重回帰分析し(内藤, 1977)、LAIとの関係が最も寄与率が高く、次いで飽差、日射量であったと報告している。長谷場ら(1966)は、温州ミカン幼木で、風速が一定の場合、蒸散速度は飽差と正比例すると報告している。またKimら(2003)は、バラの光合成・気孔コンダクタンス・蒸散複合モデルのパラメータと

して飽差が有効であるとしている。印ら(2005)は、栽培環境要因とバラ切り花の日持ち等を多変量解析し、温度がある程度高く、かつ相対湿度が低い時期には飽差が大きくなり、水分関係を良好に保ちうる形態的・生理的条件を持つ切り花が生産されることを報告している。

夜間冷房処理により温室内の飽差と、バラのみかけの蒸発散量には直線回帰がみられた(図 5-9)。夜冷区においては、除湿により飽差が大きくなり、みかけの蒸発散量も大きな値となった(図 5-9)。ヒートポンプによる夜間冷房は、除湿を伴うことで温室内の飽差が大きくなり、バラの夜間のみかけの蒸発散量が増加する。

Goto と Takakura (1992)は、レタスの葉の中心部に送風することで蒸発散量が増加し、カルシウム移動が促進されることで、生理障害であるチップバーンが軽減できることを報告している。これらのことから推測すると、夜間におけるバラの蒸発散量の増加は、カルシウムなどの養分吸収に好影響を与え、バラの品質が向上することも期待される。

但し、日中の過剰な飽差の増大は、気孔の閉鎖により気孔コンダクタンスが低下し、蒸散を抑制する(Bunce, 1995)。本試験では、ヒートポンプによる飽差の増加は、夜間のみであり(図 5-7)、気孔コンダクタンスの低下による蒸散抑制は少ないと推測される。また、日中の蒸発散量は $230 \sim 577 \text{ mL day}^{-1}$ (表 5-3)であるのに対して、夜間の蒸発散量は 100 mL day^{-1} 以下であり(表 5-3)、蒸発散量も少なく蒸散抑制は起こらなかったと考えられる。

Stanhill ら(1974)は、バラの1時間当たりの蒸発散量と太陽放射(日射)とは高い相関があり、日射が強くなると水ポテンシャルが低下することを報告している。日中においてはバラの蒸発散量は日射に強く影響されるが、日射の無い夜間の蒸発散量は、温室内の飽差に大きく影響を受ける(図 5-9)。

日中の平均飽差は、雨天の多い6月を除いて日射量の多い5月から9月が大きい値であったが、夜間の飽差は、ハイブリッド区、対照区ともに暖房機の稼働している12月から3月が大きな値であった(表 4-1, 図 4-5)。夏季の夜間の温室内飽差は5月から10月まで 0.3 kPa 程度の値で小さく、バラの夜間の蒸散は少ないと推測される。夜間冷房を行ったハイブリッド区の8月の平均飽差は 0.49 kPa と大きく、夜間冷房による蒸散の増加が期待される。従来の暖房機では、冬季における夜間の暖房でのみ飽差の増大が可能であったが、ハイブリッドシステムにより、夏季の冷房除湿を行うことで、年間を通して夜間の飽差を大きくすることができる。

第V章で温室内の水分収支から、ヒートポンプによる除湿量の約 $76 \sim 80\%$ が、夜間のバラの蒸発散量に相当すると推測したことは(図 5-11)、ハイブリッドシステムによる蒸散量の変化を明確にするもので、バラの品質向上を図る目安として、

また生理生態を解明するためにも有効である。

5) バラの収量およびハイブリッドシステムの収益性

バラ栽培において、ハイブリッド冷暖房システムと、慣行の重油式温風暖房機とを比較し、バラの収量、品質、販売価格、および冷暖房経費など経営に与える効果を1年間実測し検討した。バラの月別収穫本数は、9月にハイブリッドシステムで統計的に有意な差が多かった(表 4-2)。また、8、9月の夜間冷房期間の階級別発生率は、ハイブリッド区で上位階級発生本数が多かった(図 4-7, 表 4-4)。

その結果、1年間のバラの推定生産額は、ハイブリッド区で約 415 円 m^{-2} 増加した(表 4-5)。その増加の 90% が夜間冷房期間の増加であり、ヒートポンプによる夜間冷房の効果が高かった。

バラ栽培におけるヒートポンプの導入は、重油価格高騰時において年間の冷暖房費が 25% 削減できるだけでなく、夏季の夜間冷房によるバラの収量増加・品質向上にも有効であった。夜間冷房による生産額の増加が無いと仮定すると、ヒートポンプの法定耐用年数である7年間で原価償却するためには、A 重油価格が 54 円 L^{-1} 以上の条件でヒートポンプが償却できる(図 4-8)。これに夜間冷房による年間生産額の増加効果を加えると、A 重油価格が 32 円 L^{-1} 以上の条件でヒートポンプの導入価格が償却でき、経営に有利なことは明らかである。

これらの経費の試算については、当然ながら重油価格、電気料金、バラの販売金額などで大幅に変更する。バラの販売金額については市場の相場により大きく左右されるので予測はできないが、重油価格については図 1-1 の推移からしても今後とも低価格で供給される可能性は低い。バラ栽培を含めた施設園芸全体として、再生エネルギーの利用促進について検討する必要がある。

ハイブリッドシステムの他作物への応用

温室暖房のためのヒートポンプのハイブリッドシステムは、バラに限らず種々の作物に導入され始めた。野々下と馬場(2009)は、バラ以外にハイブリッドシステムが導入されている作物として、最高管理温度が 25°C のハウスミカン、管理温度が 26°C のマンゴー、またそれらよりも管理温度が低いピーマン、トマト、キュウリ、ナス、メロン、オオバ、ミツバ、ミョウガ、イチゴ、ブドウ、ガーベラなどにも導入されていると記述している。

2012 年および 2013 年には、農林水産省の燃油価格高等緊急対策補助事業を利用して、ヒートポンプの導入が増加している。2009 年のヒートポンプ導入面積は 148 ha であったが、2014 年には燃油価格高等緊急対策補助事業で約 400 ha 導入

される見通しであると報道している(2014年8月9日 日本農業新聞)。

静岡県における2013年までのヒートポンプの導入が面積は、バラ栽培面積の約40%に当たる15ha、ガーベラの43%に当たる12ha、温室メロンの約6%に当たる4haに導入された(静岡県経済産業部みかん園芸課, 2014年8月)。

静岡県においても、ヒートポンプは石油価格が高騰した、2008年以降に数多く導入され、標準的暖房管理温度が18℃のバラ、16℃のガーベラ、22℃の温室メロンと、高温管理される施設園芸において普及が進んでいる。

大田の試算では(大田, 2009)、燃油価格が89.2円/L¹の時、バラ栽培では農業経営費の内41%が光熱動力費を占めているとしている。同じ条件の試算で、ピーマンは42%、キュウリは32%であり、光熱動力費が経営費に占める割合は大きい。この経営試算からも、施設園芸の経営は燃油価格により大きく影響を受けることが示されており、施設園芸の脱石油化を加速させることが極めて重要な課題であることは明らかである。

持続できる施設園芸の確立

1) 太陽光発電

本研究においては、バラ栽培における暖房装置として、電気式ヒートポンプと慣行の重油式温風暖房機を組み合わせた、ハイブリッドシステムについて検討した。重油価格は世界的な石油需要の増大や、為替変動により大きく影響を受けるが、電気料金は公共料金のため価格変動は少ない。化石エネルギーである石油は限られた資源である。再生可能エネルギー利用も可能であるヒートポンプを、施設園芸に導入することは将来的にも有望である。

第VI章では再生可能エネルギーである太陽光発電と、ヒートポンプと重油式温風暖房機によるハイブリッドシステムを統合し、施設園芸における再生可能エネルギー導入の可能性について検討した。

太陽光発電は、天候の影響を大きく受けるため、天候不順の多い6月、11月の発電量は低い値であった。季節別の太陽光発電量と消費電力のバランスでは、冬季は発電量に対してハイブリッドシステムの消費力が大きく、夏季は太陽光発電量が消費電力よりも大きくなる傾向であった。季節による変動からも、太陽光発電による電力を、直接ハイブリッドシステムで使用することは困難と考えられた。

太陽光発電を、ハイブリッドシステムの電源として効率的に利用するためには、太陽光発電の売電と、2次電池の利用の2点が考えられる。冷暖房のためハイブリッドシステムが使用する電力は電力会社から購入し、太陽光発電による電力は売

電するが、施設園芸用に消費する電力の一部を再生可能エネルギーで賄う。太陽光発電による電力を、ハイブリッドシステムの消費電力に直接使用はできないが、間接的に消費電力に見合う太陽光発電は可能であり、トータルとして施設園芸への再生可能エネルギー利用につながる。2次電池は現状では高価格であり、施設園芸へ2次電池を組み込んだ太陽光発電システムの導入は、イニシャルコストの面からも困難である。しかしながら、今後の2次電池価格の低下によっては、施設園芸に導入される可能性も残されている。

本研究のハイブリッドシステムには、電気式のヒートポンプを使用した。従来の限られた資源である重油などを燃料とする、燃焼式暖房機に比較すると、ヒートポンプは再生可能エネルギーの利用が容易である。間接的ではあるが、太陽光発電を導入することで、消費エネルギー量の再生可能エネルギー化は現時点でも可能である。今後2次電池の導入やスマートグリッドなどにより、施設園芸に直接的な再生可能エネルギー利用も可能となるであろう。

2) 木質ペレット

今後再生エネルギーの利用拡大を図るためには、太陽光発電の導入に加えて、補助暖房機である重油式暖房機に対して再生エネルギーの導入促進が望まれる。

緒言でも述べたように石油の代替として、木質ペレットが期待されが、現時点における木質ペレット暖房機の価格は高価で(國武ら, 2009)、木質ペレットの供給元も限られている。今後の機器の低価格化や、広範囲な木質ペレット供給体制が確立すれば、施設園芸において普及促進が期待される。

3) 持続的施設園芸

ヒートポンプと重油式温風暖房機を組み合わせたハイブリッドシステムの施設園芸への導入は、今後の石油需要の拡大による価格高騰を考慮すると、必要不可欠な技術になると思われる。

空気熱源だけではなく、水熱源や蓄熱槽利用(島地, 2009)、地中熱源や太陽光熱源を複合的に利用したヒートポンプの研究もなされており(Ozgenerら, 2005)、ヒートポンプの効率は今後も更に向上すると思われる。

本研究で使用したハイブリッドシステムでは、主暖房装置として電気式ヒートポンプを、補助暖房機として重油式暖房機を用いたが、太陽光発電などの再生可能エネルギーを導入すれば、消費する電力分を間接的にまかなうこともできる。また今後2次電池が低価格になれば、太陽光発電による電力の夜間利用も可能となる。補助暖房機として木質ペレットボイラーを用いることで、全ての暖房用エネルギーを再生可能エネルギーに転換することも可能である。

図7-1で示したように、持続可能な施設園芸の実現のためには、温室・ハウスの保温性を更に向上させた上で、作物に

適した環境制御方法を導入し、ヒートポンプを核としたハイブリッドシステムによる冷暖房を導入することで、冷暖房コストが削減できるとともに、ヒートポンプによる夏季夜間冷房も可能となるため、夏季の作物の品質向上・収量増加が図られ、経営的にも非常に有利となる。

今までの施設園芸の環境制御は、暖房機による温度の制御だけが主流であった。暖房に加えて、夜間冷房、冷房除湿が可能なハイブリッドシステムは作物の品質向上、収量増加をもたらすことが期待でき、施設園芸にとっては革新的な技術である。

ハイブリッドシステムの導入と、再生可能エネルギーである太陽光発電や木質ペレットの導入により施設園芸の脱石油化を図ることができ、将来にわたって持続的な施設園芸の展開が可能となる。

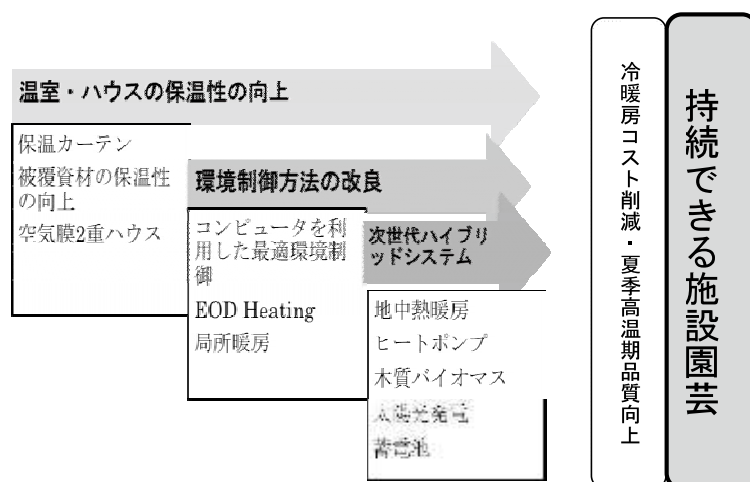


図 7-1 持続できる施設園芸を目指した温室・ハウスの冷暖房技術

摘 要

施設園芸は、環境調節により高品質の作物を安定的に栽培できることから、高収益が期待でき今後も発展が期待される。しかし、経営費に占める暖房費の割合が大きく、また暖房設備の95%は石油を利用しているため、省エネ・脱石油化は重要課題である。本研究では、ヒートポンプと石油燃焼式温風暖房で構成されるハイブリッドシステムを、18℃以上の高温で栽培管理するバラを対象作物にして、冷暖房費・生産量および品質への影響を1年間にわたり実証する研究を行った。

ハイブリッドシステムは、運転費が安価なヒートポンプを優先的に稼働し、暖房負荷が増加した場合に石油燃焼式暖房機が稼働する。ヒートポンプは、石油燃焼式暖房機に比較すると風量が少ないので、温室内における循環扇の設置について検討し、温室内で気流を起こす配置により、風速および気温が均一化することを明らかにした。

温室の暖房費削減の目的で、暖房能力49.2 W m²のヒートポンプと、暖房能力199.4 W m²の重油式温風暖房機を併用したハイブリッドシステムと、慣行の重油燃焼式温風暖房機による年間の冷暖房コストについて、静岡県磐田市の同面積の温室において実測比較した。暖房の最低夜温18℃設定におけるハイブリッド区のA重油使用量は12.61 L m²であり、対照区33.49 L m²の約38%であった。ハイブリッド区の年間消費電力量は14.91 MJ m²で、対照区の年間消費電力量は1.13 MJ m²であった。温室の暖房用に投入したエネルギー量は、対照区の投入エネルギー量が81.62 MJ m²であるのに対して、ハイブリッド区の年間投入エネルギーは43.77 MJ m²であった。ヒートポンプ消費電力を、暖房定格条件下のCOP 3.79を用いて熱エネルギーに変換して比較すると、ハイブリッド区が78.19 MJ m²であり、対照区の81.62 MJ m²と比較して少なく、ヒートポンプは定格以上の能力を発揮していた。2009~2010年時の電気料金・A重油実勢価格65.8円 L⁻¹で、バラ温室における年間冷暖房用電力冷暖房コストを比較した結果、夏季の夜間冷房を行うことにより冷房経費は増加するが、年間の冷暖房費は対照区の2162円 m²に比較して、ハイブリッド区は約24%の517円 m²の暖房費が削減でき1645円 m²であった。ハイブリッドシステムは、慣行の重油式暖房機より、投入エネルギーは約46%削減でき、夏季夜間冷房を加えても、年間冷暖房費が約24%削減できた。

次にバラ栽培において、ハイブリッドシステムによる冬季の暖房と夏季夜間冷房を組み合わせた温度制御と、慣行の冬季暖房のみの環境制御が、バラの収量、品質、販売価格、および冷暖房経費など経営に与える効果を2009年6月から2010年5月までの1年間比較した。切花総重量は夜間冷房期

間および年間の切花総重量でハイブリッド区が、対照区と比較して有意な差が多かった。切花の階級別の収穫本数は、夜間冷房期間は、対照区と比較してハイブリッド区で上位階級の収穫本数が多く、60 cm以上の上位階級ではハイブリッド区が対照区の約2倍の本数であった。販売価格のシミュレーションの結果、年間の生産額ではハイブリッド区が、対照区と比較して415円 m²粗収益が増加した。その増加の90%が夜間冷房期間の増加であり、ヒートポンプによる夜間冷房の効果が高かった。バラ栽培におけるヒートポンプの導入は、重油価格高騰時において暖房費が削減できるだけでなく、夏季の夜間冷房によるバラの収量・品質向上効果もあった。暖房費削減効果と、夏季における収量・品質向上効果を加えると、2009~2010年の電気料金であれば、A重油価格が32円 L⁻¹以上でヒートポンプの導入価格が償却でき、経営に大きな利益をもたらすことができた。

バラ養液栽培における夏季夜間冷房時の温室内の水分動態と、バラの蒸散量に及ぼす影響について検討した。夜間冷房により、気温、相対湿度、絶対湿度は、対照区と比較して低く、飽差は高い値で推移した。夜間のバラのみかけの蒸発散量と飽差とは、直線回帰で表すことができ、飽差が大きいとみかけの蒸発散量が増加した。水分収支法により求めたバラの蒸発散量と、重量法により測定した夜間冷房中のみかけの蒸発散量の測定から、夏季夜間冷房によりバラの夜間の蒸発散量は増加し、除湿量の約76~80%に相当すると結論した。

さらに、本システムへの太陽光発電利用の可能性について検討した。発電時間帯と電力消費時間帯が異なり、太陽光発電電力を直接ハイブリッドシステムで使用できなかったが、太陽光発電の売電、二次電池の利用という2点を提案した。

以上のことから、ハイブリッドシステムは、慣行栽培法に比べ大幅に冷暖房費が削減できることを実証した。さらに、夜間冷房、冷房除湿が新たに可能となるハイブリッドシステムは、品質が悪化する夏季におけるバラの品質向上・収量増加をもたらした。冬季の暖房費削減の目的で導入したヒートポンプが、夏季のバラの品質向上にも利用できるため、ハイブリッドシステムは年間を通して有効に利用できる。またバラだけでなく他の作物種にも充分適用可能であることから、施設園芸にとっては革新的な技術であると考えられる。さらにヒートポンプは、太陽光発電などの再生可能エネルギーを導入すれば、消費する電力分を間接的にまかなうこともできることも示し、施設園芸における作物栽培のための安定した環境を維持するための制御方法として、ハイブリッドシステムは必要不可欠な技術になると考えられる。

Summary

Protected horticulture is expected to produce a good quality of crop, because it can control the environment in the greenhouse optimally for the crop. The main problem of the greenhouse management is the high cost of heating. Above the 95% of the heating machine are using oil to heat the greenhouse.

In this study, the effectiveness of Hybrid system for greenhouse heating was examined used the cut rose production greenhouse which grew above 18 °C through the year. Heat pump which running cost is lower than oil heater runs preferentially. If the heating load becomes high, the oil heater runs subsequently. The air flow of the heat pump blower is weaker than oil heater. We investigated the effect of the circulator in the greenhouse and concluded the circulator is effective to homogenize the temperature in the greenhouse.

We compared the total cost of greenhouse heating between a conventional oil-fired air heater and a hybrid system comprising an electric heat pump (rated at 49.2 W m⁻²) and an oil-fired air heater (rated at 199.4 W m⁻²) in identical rose greenhouses in Iwata city, Shizuoka, Japan. To maintain a minimum temperature of 18 °C required an annual consumption of heavy oil for heating of 12.61 L m⁻² by the hybrid system and 33.49 L m⁻² by the oil heater. The annual consumption of electricity was 14.91 MJ m⁻² by the hybrid system and 1.13 MJ m⁻² by the oil heater. The total energy input for heating was 43.77 MJ m⁻² for the hybrid system and 81.62 MJ m⁻² for the oil heater. Using 3.79 as the coefficient of performance of the heat pump gave an estimated energy use of 78.19 MJ m⁻² for heating by the hybrid system, lower than the calculated value of 81.62 MJ m⁻²; that is, the rated COP was exceeded. At an oil price of 65.8 yen L⁻¹, the annual running cost was 1645 yen m⁻² in the hybrid-system greenhouse and 2162 yen m⁻² in the oil-heater greenhouse. Overall, the hybrid system resulted in savings of 46% of input energy and about 24% of energy costs.

We also compared the annual production and quality of cut roses and total greenhouse air conditioning and heating costs using a conventional oil-fired air heater and a hybrid system from June 2009 to July 2010. There was no difference in total cut rose weight between systems during the period before night cooling, but production increased in the hybrid system during the night cooling period. The number of cut roses with stem length >60 cm in the hybrid system was approximately twice that in the conventional system during the night cooling period. The annual production value increased by 415 yen m⁻² in the hybrid system; 90 % of the increase occurred during the night cooling period. The hybrid system both decreases heating costs at a time of soaring oil prices and improves rose yield and quality by nighttime cooling. The installation cost can be amortized in less than 8 years at an oil cost of 32 yen L⁻¹ due to the reduced costs and increased profits, which greatly improve the economics of rose cultivation.

We compared the environmental factors in a greenhouse and the evapotranspiration from rose planters in the greenhouse under night cooling by a heat pump with those in a control (an identical rose greenhouse but without the heat pump). The heat pump was only operated at night, and decreased the temperature, relative humidity, and absolute humidity compared to those in the control. After the night cooling, the vapor pressure deficit and rose transpiration become higher than the control. The evapotranspiration from rose planters was strongly and significantly correlated to the vapor-pressure deficit. The evapotranspiration was measured by the water balance method and the value measured using the electric balance. From these result, we conclude that evapotranspiration from the rose planter calculated by the water balance method equaled 76 to 80 % of the dehumidified water.

We also investigated the possibility to use solar power generation as energy for hybrid system. It is difficult to use solar power energy for hybrid system directly, because the timing of supply and demand of the energy was different. So we proposed the use of rechargeable battery and electricity sales.

From these result, we demonstrated that hybrid system can reduce the heating cost drastically compare to the normal oil heating system. Hybrid system can cool and also dehumanize the greenhouse atmosphere during the nighttime in summer season. Hybrid system can be used year round effectively. So the hybrid system can also be used many other crop, it seems the revolution system. Moreover, hybrid system can use the solar power energy indirectly. It will be possible to use the

hybrid system as a sustainable heating system for protected horticulture. More over, electric heat pump can use the reproductive energy such as solar energy. Hybrid system will become an indispensable system to control the greenhouse environment in stable condition.

謝 辞

本学位申請時には主査をご担当頂いた、明治大学農学部農学科池田敬准教授に、また副査をご担当頂きご指導を賜った、同農学部農学科半田高教授、同黒川農場玉置雅彦教授、同農芸化学科中林和重准教授に深く感謝いたします。また、論文執筆および本試験の実施に対しご協力ご指導いただいた、共同研究者の中部電力株式会社守谷栄樹氏、三菱重工冷熱株式会社安井清登氏、ネポン株式会社野々下知泰氏、メイテック株式会社絹村憲司氏に合わせて深く感謝いたします。

本実験期間中、数々のご配慮ならびにご激励を頂いた、元静岡県農林技術研究所 大塚寿夫所長、元静岡県農林技術研究所 堀内正美研究統括監の各位に感謝の意を表します。

調査および実験の遂行に際して貴重なご助言をいただき、かつご協力いただいた、静岡県農林技術研究所 大石直記野菜科長、本間義之育種科長、外岡慎花き科長、大須賀隆司経営・生産システム科長、寺田吉徳上席研究員、貫井秀樹博士、静岡県中部農林事務所 五十右薫地域振興課長、静岡県東部農林事務所 前島慎一郎班長、静岡県農山村共生課 渥美剛主査、静岡県農林大学校 藤浪裕幸主査、静岡県農林技術研究所伊豆農業研究センター 馬場富二夫博士、並びに関係研究職員各位に、心より感謝の意を表します。

さらに実験施設の運営管理および調査においては、静岡県農林技術研究所元技能長 鈴木礼三氏、同山崎裕隆氏、同技能長 佐野伸子氏、静岡県農林技術研究所技能長 白鳥幸広氏、同大場詞信氏、同中村寛氏、静岡県農林技術研究所 山本素夫氏、同柏原芳雄氏、川江絹代氏には多大なる労力を提供していただきました。

生産現場で抱える問題点や栽培方法についてご教示いただき、研究について現場からの意見を率直に示していただいた、静岡県名誉農業経営士 山崎完治氏、静岡県農業経営士 安間悦郎氏、農事組合法人吉岡バラ温室組合 大場宏基氏および吉岡バラ温室組合員の皆様、静岡県花き園芸ばら部会の皆様には深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 馬場勝. ヒートポンプを組み合わせた新暖房システムによる石油節減効果. 施設と園芸. 138: 13-17. 2007
- 2) 馬場勝. 除湿・湿度制御. 林真紀夫編著. 施設園芸におけるヒートポンプの有効利用. (社)農業電化協会, 東京. 105-109. 2009
- 3) Carlini, M., Villarini, M., Esposto, A., Bernardi, M. Performance Analysis of Greenhouses with Integrated Photovoltaic Modules. Comp. Sci. Its Appli. 206-214. 2010
- 4) Darlington, A.B., Dixon, M.A., Tsujita, M.J. The influence of humidity control on the production of greenhouse roses (*Rosa hybrida*). Sci. Hort. 49(3-4): 291-303. 1992
- 5) Doi, M., Shimomura, N., Inamoto, K., Imanishi, H. Contribution of Individual Bent Shoot Layers to Cut Flower Productivity in Shoot-bending 'Asami-Red' Roses. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 78 (4): 478-484. 2009
- 6) 道園美弦, 神門卓巳, 久松完, 大宮あけみ, 市村一雄, 柴田道夫. アフリカンマリーゴールドの花芽分化・発達に及ぼす End-of-day heating 処理の影響. 園学研. 11(4): 553-559. 2012a
- 7) 道園美弦, 久松完, 大宮あけみ, 市村一雄, 柴田道夫. 低温期のスプレーグク施設栽培における EOD-heating の有効性. 園学研. 11(4): 505-513. 2012b
- 8) フローリスト編集部. 花の切り前(改訂版). 誠文堂新光社, 東京. 40-41. 1994
- 9) 藤田政良. 農業技術体系花き編 3 環境要因とその制御. 農山漁村文化協会, 東京. 3: 411-412. 1999
- 10) Goto, E. and Takakura, T. Prevention of lettuce tipburn by supplying air to inner leaves. Trans. ASAE, 35, 641-645. 1992
- 11) Hamrick, D. Rosa. Ball Redbook Vol 2. Ball Publishing, IL. 601-620. 2003
- 12) 原靖英, 柳下良美, 渡辺茂, 深山陽子, 小泉明嗣, 腰岡政二, 窪田聡, 畔柳武司, 馬場勝, 山元恭介. 異なる室温条件がバラの株元加温の生産性および切り花品質等に及ぼす影響. 園学研 9(別)288. 2010
- 13) 長谷場徹也, 武智修. 蒸散に関する研究(1) 柑橘の日変化について. 農業気象. 22(1): 11-6. 1966
- 14) 長谷川浩巳. ヒートポンプによる地球温暖化防止(CO2 削減). 施設園芸におけるヒートポンプの有効利用. (社)農業電化協会. 東京. 9-11. 2009
- 15) 林勇. 日本における切り花栽培の品種・技術の変遷. 農業技術体系花き編 7 カーネーション(ダイアンサス)バラ. 農山漁村文化協会. 東京. 7: 267-277. 1996
- 16) 林勇. 栽培の基礎. 林勇編著, 切り花栽培の新技术改訂バラ上巻, 誠文堂新光社. 東京. 86-98. 1998
- 17) 林真紀夫. 冷房. 農業技術体系花き編 3 環境要因とその制御追録第 3 号. 農山漁村文化協会. 東京. 3: 449-458. 2001
- 18) 林真紀夫. 暖房. 日本施設園芸協会編. 施設園芸ハンドブック. 園芸情報センター. 東京. 127-130. 2003
- 19) 林真紀夫. 施設園芸における省エネルギー技術とヒートポンプ利用, 暖冷房除湿による湿り空気の状態変化. 林真紀夫編著. 施設園芸におけるヒートポンプの有効利用. (社)農業電化協会. 東京. 13-23, 38-42. 2009
- 20) 林真紀夫, 古在豊樹, 中村潤, 渡部一郎. 温室におけるヒートポンプ利用(1)暖房システム. 農業気象. 38(4): 379-378. 1983a
- 21) 林真紀夫, 古在豊樹, 中村潤, 渡部一郎. 温室におけるヒートポンプ利用(2)夏期夜間冷房. 農業気象. 39(3): 181-189. 1983b
- 22) 北条雅章, 伊東正. 温室の地中熱交換暖房に関する一考察. 千葉大園芸報. 30: 47-52. 1982
- 23) 池田英夫. 施設園芸ビジネスを考える ー目指せ 1 億円プレイヤーー. 農耕と園芸. 63(1): 22-26. 2008
- 24) 印炳賤, 稲本勝彦, 土井元章, 森源治郎. 栽培環境要因とバラ切り花の形態的・生理的特性ならびに日持ちとの関係の多変量解析. 園学雑.

- 74(別 2)233. 2005
- 25) 石井雅久, 奥島里美, 森山英樹, 降幡泰永. 循環扇が温室内の気流・気温分布に及ぼす影響. 植物環境工学. 24(3): 193-200. 2012
- 26) 岩崎泰永, 吉田千恵, 宍戸良洋. 空気膜二重構造ハウスの利用による施設内環境変化が半促成栽培キュウリの生育および収量に及ぼす影響. 園学研. 10 (1): 49-54. 2011
- 27) 陣川 雅樹, 大原 誠資, 吉田 貴紘, バイオマス研究の 10 年を振り返る(6)木質バイオマスの利用: 木質バイオマスの収集・運搬, エタノール化および木質ペレットの高性能化. 農業及び園芸. 88(5): 579-590. 2013
- 28) 梶原真二, 勝谷範敏. バラのロックウール栽培における台木の種類および台木由来同化専用枝の有無が切り花本数と品質に及ぼす影響. 園学研. 2(4): 315-318. 2003
- 29) Kamp,P.J.H., Timmerman,G.J. コンピュータによる温室環境の制御. -オランダの環境制御法に学ぶ. (社)日本施設園芸協会監修. 東京. 1-197. 2004
- 30) 河崎靖, 鈴木克己, 安場健一郎, 高市益行. 温風ダクト吊り下げによるトマトの生長点—開花花房付近の局部加温が垂直温度分布, 収量および燃料消費量に及ぼす影響. 園学研. 10 (3): 395-400. 2011
- 31) 川嶋浩樹. 高保温性能で大幅な省エネを可能にする次世代型パイプハウスの開発. 農業及び園芸. 89(1): 129-136. 2014
- 32) 川嶋浩樹, 高市益行, 馬場勝, 安井清登, 中野有加. 空気熱源式ヒートポンプを利用したハイブリッド暖房方式による投入エネルギーおよびCO₂排出量の削減効果. 野菜茶業研報. 7: 27-36. 2008
- 33) 川嶋浩樹, 冷房利用の実際と効果. 林真紀夫編著. 施設園芸におけるヒートポンプの有効利用. (社)農業電化協会. 東京. 93-98. 2009
- 34) Kim, S. H. and H. Lieth. A Coupled Model of Photosynthesis, Stomatal Conductance and Transpiration for a Rose Leaf (*Rosa hybrida* L.). Ann. Bot. 91(7): 771-781. 2003
- 35) Kim, S. H. and H. Lieth. Effect of shoot-bending on productivity and economic value estimation of cut-flower rose grown in Coir and UC Mix. Sci. Hort. 99: 331-343. 2004
- 36) 北宅善昭. 温室内及び土壌における水収支の概念図 (北宅, 1992) 5 訂施設園芸ハンドブック. 日本施設園芸協会編. 施設園芸ハンドブック. 園芸情報センター. 東京. 161. 2003
- 37) 北宅善昭, 施設園芸における環境調節. TMS 研究会. 1: 10-21. 161. 2009
- 38) 福井博一, ヒートポンプの総合活用(暖房, 冷房, 除湿). 農業技術体系 花卉編 3 環境要因とその制御 追録第 12 号. 農山漁村文化協会. 東京. 546 の 11 の 2-546 の 11 の 12. 2010
- 39) 國武みどり, 井手治, 龍勝利, 小熊光輝, 奥幸一郎. 木質ペレット暖房機の暖房特性. 福岡総農試研報. 29: 37-39. 2010
- 40) 小山佳彦, 山中正仁, 石川順也, 宇田明. バラ切り花の日持ちは栽培環境に影響される. 兵庫農技総セ研報. 57: 10-14. 2009
- 41) 古在豊樹, 林真紀夫, 鈴木等, 渡部一郎. 温室水耕栽培キュウリの蒸発散量と環境要因の関係. 農業気象. 38(2): 153-159. 1982
- 42) 古在豊樹, 林真紀夫, 板木利隆. 園芸環境工学における最近の話題(4)ヒートポンプ(1)原理と利用場面. 農業及び園芸. 61(5): 671-675. 1986a
- 43) 古在豊樹, 林真紀夫. 園芸環境工学における最近の話題(5)ヒートポンプ(2)システムの構成と特徴. 農業及び園芸. 61(6): 779-787. 1986b
- 44) 古在豊樹, 伊藤正, 稲山光男, 小林肇. マイクロコンピュータによる温室管理システムの開発と実用化試験. 農業気象. 38(1): 45-50. 1982
- 45) Lieth, J.H., S.H. Kim. Effects of shoot-bending in relation to root media on cut-flower production in roses. Acta Hort. 547: 303-310. 2001
- 46) Marcelis-van Acer,C.A.M. Effect of temperature on development and growth potential of axillary buds in roses. Sci. Hort. 63(3-4): 241-250. 1995
- 47) 丸尾達. 跳躍する韓国の最新施設園芸事情. 施設と園芸. 146: 51-66. 2009
- 48) 森口幸宣, 上島良純, 広部純, 神藤宏. 夜冷及び根圏冷却がバラの生育, 収量に及ぼす影響. 和歌山農試研報. 12: 51-58. 1990
- 49) 本村晋一, 土井元章, 稲本勝彦, 今西英雄. バラ切り花の日持ち性に影響を及ぼすプレハーベスト要因の解析. 園学雑. 74(別 2): 511. 2003

- 50) 内藤文雄. 施設内作物の蒸散と水分収支. 位田藤久太郎編著. 施設園芸の環境と栽培. 誠文堂新光社. 195-211. 1977
- 51) 二村幹雄, 山口徳之, 池内都, 和田朋幸, 大石一史. 夏季高温時の超微粒ミスト噴霧と夜間冷房がバラ切り花の収量・品質に及ぼす影響. 愛知農総試研報. 44: 53-59. 2012
- 52) 野々下知泰. ヒートポンプの特徴と利用. 施設と園芸. 147: 56-61. 17. 2009
- 53) 野々下知泰, 馬場勝. 農業分野での具体的設置事例. 林真紀夫編著. 施設園芸におけるヒートポンプの有効利用. (社)農業電化協会. 東京. 121-125. 2009
- 54) 小国研作. 温室用ヒートポンプに関する研究. 農業気象. 37(4): 317-322. 1982
- 55) 岡田益己, 暖房, 三原義秋編. 温室設計の基礎と実際. 養賢堂. 東京. 182-204. 1980
- 56) 岡田益己, 林勇. 空気膜ハウスの簡易試作例とその特徴. 農業及び園芸. 58(1): 57-60. 1983
- 57) 岡田益己, 換気回数の測定法. 日本農業気象学会関東支部編. 農業気象の測器と測定法. 農業技術協会. 東京. 205-207. 1988
- 58) Ohkawa, K. and Suematsu, M. Arching cultivation techniques for growing cut rose. Acta Hort. 482: 47-51. 1999.
- 59) 大川清. 収量・品質を左右する環境要因. バラの生産技術と流通. 養賢堂. 東京. 190-235, 304-355. 1997
- 60) 大山克己, 古在豊樹. 園芸用施設の暖房費およびCO₂ 排出量削減(1). 農業及び園芸. 83(11): 1157-1163. 2008
- 61) 大田直. 地球温暖化と燃油高騰をめぐる我が国の施策. 林真紀夫編著. 施設園芸におけるヒートポンプの有効利用. (社)農業電化協会. 東京. 3-8. 2009
- 62) Ozgener, O, Arif Hepbasli. Exergoeconomic analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system. Ap. Ther. Eng. 25: 1459-1471. 2005
- 63) Ozgener, O, Hepbasli, A. A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems. Renew. Sustain. Ener. Review. 11: 482-496. 2007
- 64) Plaut, Z. and N. Zieslin. The effect of canopy wetting on plant water status, CO₂ fixation, ion content and growth rate of 'Baccara' roses. Phys. Plant. 39 (4): 317-322. 1977.
- 65) 酒井広蔵. 求められる環境条件と環境管理. 品質・収量を左右する要因と技術対応. 農業技術体系花き編 7 カーネーション(ダイアンサス)バラ. 農山漁村文化協会. 東京. 7: 315-319. 1996
- 66) 佐々木皓二. 空気-空気型ヒートポンプによる温室環境調節. 農業施設. 20(1): 121-127. 1989
- 67) 佐々木皓二. 地中熱交換装置. 日本施設園芸協会編. 新訂 施設園芸ハンドブック. 園芸情報センター. 東京. 347-354. 1987
- 68) 佐藤公宣, 印炳賤, 伊東香澄, 稲本勝彦, 森源治郎, 土井元章. 栽培中の相対湿度がバラ切り花の収量, 品質, 日持ちならびに蒸散特性に及ぼす影響. 園学雑. 74(別 2): 544. 2005
- 69) 佐藤展之, 守谷栄樹, 安井清登, 野々下知泰. 空気熱源式ヒートポンプと燃焼式温風暖房機とのハイブリッド運転によるバラ栽培の暖房費削減効果. 植物環境工学. 25(1): 19-28. 2013a
- 70) 佐藤展之, 守谷栄樹, 安井清登, 野々下知泰. 空気熱源式ヒートポンプと燃焼式温風暖房機とのハイブリッドシステムによる冷暖房管理がバラ栽培の収量および品質に及ぼす影響. 植物環境工学. 25(2): 90-101. 2013b
- 71) 佐藤展之, 守谷栄樹, 安井清登, 野々下知泰. 空気熱源式ヒートポンプによる夜間冷房時のバラ栽培温室の水分動態. 植物環境工学. 26(2): 98-108. 2014
- 72) 島地英夫. 複合環境制御と遠隔制御ネットワークシステム. 日本施設園芸協会編. 新訂 施設園芸ハンドブック. 園芸情報センター. 東京. 306-316. 1987
- 73) 島地英夫. 水熱源ヒートポンプ利用の実際, 蓄熱槽利用ヒートポンプシステム. 林真紀夫編著. 施設園芸におけるヒートポンプの有効利用. (社)農業電化協会. 東京. 80-83, 84-87. 2009
- 74) Shimomura, N, Inamoto, K, Doi, M, Sakai, E, Imanishi, H. Cut flower productivity and leaf area index of photosynthesizing shoots evaluated by image analysis in "Arching" roses. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 72: 131-133. 2003.
- 75) Shin, H.K., J.H. Lieth, S.H. Kim. Effects of temperature on leaf area and flower size in rose. Acta Hort. 547: 185-191. 2001

- 76) 神藤 宏, 和佐憲道. 施設栽培におけるヒートポンプの有効利用に関する研究(第1報) 空気熱源ヒートポンプを補助熱源とする太陽熱集熱・水蓄熱システムによるハウス暖房の効果と実用性について. 和歌山農試研報. 12: 15-24. 1987a
- 77) 神藤 宏, 和佐憲道, 西森裕夫, 坂口春雄. 施設栽培におけるヒートポンプの有効利用に関する研究 (第1報) 空気熱源ヒートポンプ利用によるハウス内の暖・冷房効果と実用性について. 和歌山農試研報. 12: 25-32. 1987b
- 78) Soo-Hyung Kim, Heinrich Lieth, J. Effect of shoot-bending on productivity and economic value estimation of cut-flower roses grown in Coir and UC Mix. Sci. Hort. 99: 331-343. 2004
- 79) Stanhill, G and J. S. Alvers. Solar radiation and water loss from glasshouse roses. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 99(2): 107-110. 1974
- 80) 杉浦浩文, 谷野章, 土屋和, 飯本光雄, 田川彰男. 太陽光発電エネルギーで動作するビニルハウス側窓開閉装置のモデル実験. 農機学. 64(6): 128-136. 2002
- 81) 太陽光フィールドテスト事業に関するガイドライン[設計施工・システム編]策定委員会, 太陽光発電フィールドテスト事業に関するガイドライン 設計施工・システム編太陽光発電の効果的な導入のために. 2010
- 82) 高倉直. 温室の冷暖房と換気 (米国農業工学会施工例). 農業気象. 38(1): 65-70. 1982
- 83) 寺田幹彦, 影山詳弘, 小西国義. 養液栽培におけるバラの生長と養水分吸収との関係. 園学雑. 66(1): 149-155. 1997a
- 84) 寺田幹彦, 田村明子, 影山詳弘, 小西国義. 栽培時期と灌水点がバラの生長, 水消費量および切り花収量に及ぼす影響. 園学雑. 66(3・4): 569-574. 1997b
- 85) 山田勝. 大規模施設園芸の経営課題. 愛知農総試研報. 40: 9-14. 2008
- 86) 山本雄二郎. 地中熱交換ハウスの温度環境及び熱特性. 農業気象. 29: 11-15. 1973
- 87) 谷野章. 太陽光発電エネルギーによる夏季の園芸施設冷房技術の開発. 島根大生物資源研報. 10: 66-67. 2005
- 88) 谷野 章, 門脇正行. 園芸施設の屋根を利用した太陽光発電. 島根大生物資源研報. 14: 60-61. 2009
- 89) 安武大輔, 宮内樹代史, 北野雅治, 山根信三, 山本由徳, 渡部晃由起, 横山京介, 平井真雄. 園芸施設における太陽光・風力を利用したハイブリッド型省エネルギーシステムの試験的構築. 高知大学術研報. 農学. 57: 55-64. 2008

静岡県農林技術研究所 〒438-0803 静岡県磐田市富丘 678-1
電話(0538) 35-7211

茶業研究センター 〒439-0002 菊川市倉沢 1706-11
電話(0548) 27-2880

果樹研究センター 〒424-0101 静岡市清水区茂畑
電話(054) 376-6150

伊豆農業研究センター 〒413-0411 賀茂郡東伊豆町稲取 3012
電話(0557) 95-2341

森林・林業研究センター 〒434-0016 浜松市浜北区根堅 2542-8
電話(053) 583-3121

平成 28 年 3 月 24 日 印刷
平成 28 年 3 月 24 日 発行

〒438-0803 静岡県磐田市富丘 678-1

編集兼
発行者

静岡県農林技術研究所

電話(0538) 35-7211

住所 袋井市新屋 4 丁目 5 ー 2

印刷所

名称 松本印刷株式会社 袋井営業所

電話 (0538) 43-6300