

園芸施設用ヒートポンプの 普及・拡大のための課題とその改善策

改善策 1 初期投資額節減のためのヒートポンプ台数の削減 —設備容量の決め方について—

関山 哲雄・古在 豊樹

特定非営利活動法人 植物工場研究会

1. はじめに

特定非営利活動法人 植物工場研究会（古在豊樹理事長）では、人工光・太陽光型植物工場における光熱費の節減に関連し、ヒートポンプ（以下HPと略す）の効率的な利用技術の開発が重要と考え、2013年4月に「農業用ヒートポンプ分科会」を組織した。その「農業用ヒートポンプ分科会」では、関係分野の有識者によってHPに関する調査、測定結果に関する評価や関連情報の交換などを目的として、2017年6月までに43回の会合を開き活動してきた。

施設園芸におけるHPの利用は、熱エネルギーへの変換・利用効率が高いこと、また、冷房や除湿も可能であることから古くから関心が寄せられ、実用化のための研究が行われてきた^{1),2)}。しかし、その普及については、油炊き温風暖房機（以下、暖房機と略す）が比較的安価で簡便に使用できることからほとんど進まなかった。そのような状況のなか2013～2015年にかけて農水省で実施された「燃油価格高騰緊急対策」に係わる事業の実施により、普及が急速に進み現在3万台ほどに達し、暖房面積の7%程の普及率に達したとされている³⁾。これを契機として本格的な普及段階に入ることが期待されたが、その後は足踏み状態と思われ、このままでは、排CO₂ガス問題への今後

の対応によっては暖房機の使用が制限されたり、あるいは燃費高騰の際には過去にも経験した夜間の適温管理がしにくくなることも懸念される。

そこで、施設園芸・植物工場へのHPの将来の本格的な普及に少しでも寄与することを目的として、本来、園芸施設用空調機として優れた特性を有しているHPの普及・拡大を妨げている諸要因の抽出と、それらの改善策について、前述の「農業用ヒートポンプ分科会」における活動内容を要約した結果を数回に分けて紹介したい。

2. HPの普及・拡大を妨げている要因

HPは、50℃程度までの低温域熱源として熱エネルギーへの変換・利用効率が極めて高く、かつ冷房（除湿）が可能であり、燃焼をともなう暖房機にみられる排CO₂ガス問題を軽減もしくは使用電源によってはほぼ皆無にすることが可能であり、まさに園芸施設用の空調機として有利な特性を有している。しかし、いまだに本格的な普及段階に至っていない。

その要因として下記の諸点を抽出した。

- a. 暖房機に比べてHP本体や関連の受電施設などの初期投資額の負担が大きい。

園芸施設用暖房機の標準的な暖房能力が60～180kWであるのに対し、園芸施設で使用されて

いる HP の暖房能力は 3～22 kW 程度で比較的小容量であり、暖房能力 1 kW 当たりの HP 本体価格は暖房機より 4～5 倍高いのが現状である。さらに、契約電力が一定規模以上になるとキュービクルなどの受電設備が必要となるなどのことから、HP には前述のとおり大きな特徴を有しているが、これまでの暖房機に比べて、初期投資額の負担が大きいと認識されている。

事実、当分科会内部における討論においても、エネルギーの変換・利用効率が高いことは共通認識されているが、全暖房負荷をすべて HP で担うことについては異論が強かった。

b. 暖房コストの低減効果が期待されたほど高くない。

農水省により実施された補助事業の目的は、石油消費量の節減が主眼であり、暖房機がすでに設備されていて園芸施設で石油を消費しているケースを補助の対象とした。したがって、既設の暖房機を稼働させながら HP を追加設備する状況であり、HP の使用実績としてはこれまでの暖房機の利用者が暖房機を HP に置き換えたいと思うほどの光熱費削減効果を感じるまでには至らなかったと思われる。

c. HP を使用するための電気の基本料金が増加し、とくに暖房しない季節における基本料金の負担に不満がある。

HP を使用する場合は、その最大消費電力に見合う基本料金を 1 年中支払うことになり、とくに、暖房しない季節では HP を使用しないのに基本料金を支払うことに不満がある。

d. 空気熱源式の HP では外気温が低い時や除霜のために成績係数が低下する。

HP の成績係数（使用できる温または冷熱量を消費電力量で除した値で、以下 COP と略す）は、室内、室外の温度差と、負荷率（部分負荷率とも呼ばれ、HP が実際に発生している熱量を HP の標準的な発生熱量で除した値）の 2 つの要素に

よって影響される。HP を暖房用として使用する場合、とくに寒冷地では、外気温の影響を強く受けて COP が低下する。さらに、屋外機の熱交換部分において凝結し氷結すると、屋外器の熱交換能力が低下するため、暖房機能を一時停止して除霜（デフロスト）するために COP が低下する。

e. HP の特徴である冷房・除湿機能を活かす段階に至っていない。

HP の冷房・除湿機能を栽培に活用するまでの研究がまだ不十分であったり、その研究実績が実用化していないために、収量増加、高品質化ならびに生産の安定化など本来期待される諸効果を栽培者が実感するところまでには至っていない。

3. HP の普及・拡大のための改善策

HP の設備費や暖・冷房費を節減するための一層の推進と、CO₂ ガスの排出を抑制するためには、以下の 3 点をとくに重要な要点と考える。

- 園芸施設の保温性を高めて最大暖房負荷を極力小さくする。
- 太陽熱を効率的に蓄熱し、夜間における暖房の補助熱源として活用する。
- 天候などによる太陽熱の蓄熱量の不足を HP により補うハイブリッド方式（暖房器とのハイブリッドとは異なる）とし、その際使用する HP は高 COP 状態で制御する。また、冷房（除湿）機能の積極的な活用を図る。

以上の要点に基づき、HP の普及・拡大を図る具体的な改善策を以下のとおりとした。

◇改善策 1：暖房機に比べ HP 本体や関連の受電施設などの初期投資額の負担が大きいことに対して、HP の暖房能力または設置台数を減らすことにより初期投資額の負担を軽減する。

HP 本体価格の低減はメーカー側の努力が切望されるが、そのためにはある程度の普及が条件とされる。そこで、当面可能な対策として、暖房能力がより小さな HP にしたり、設置台数を減らすことによって、初期投資額の軽減を図る方策につ

いて検討する。

暖房機器の設備容量は、最大暖房負荷により決められるが、その算出に際しての設計外気温は、数年に1度起こるような低温時でも室内気温は予定した暖房設定温度に制御できるようにするとの考えに基づいている。この考えによれば、例えば、千葉県我孫子市のアメダスの観測値によれば、外気温が零下4～零下7℃という厳しい低温の発生日数は、11～4月の暖房期間（最大暖房負荷に関係するのは実質的には1、2月）において許容発生率10%とする場合では6日程度となり、その6日間のために定格消費電力6 kWのHPを1～3台/25a多く設備することになり、工事費を含むHPの価格が100万円/台ほどであることを考慮すると、設備容量の算出方法の見直しと、減らせる必要台数についての検討を行う必要がある。なお、上述の場合で6日程度とはいえ、暖房設定温度より約4℃ほど低い温度で室温が経過することが考えられるので、その作物に及ぼす低温の影響によってはより安価な補助熱源を設備する必要性が生じる。

◇改善策2：暖冷房負荷に応じた制御を行い消費電力量の節減を図る。

HPのCOPは、暖冷房負荷の状態（空気熱源式では内外の気温差と負荷率）によって大きく変化する。負荷率については一般的に定格容量の30%減ほどのところでCOPが最も高くなり、その前後では1/2程度までに低下することを実測している。暖房設定温度が一定であっても外気温は常に変化することから、COPに影響する2つの要因も常に変化することになる。そこで、COPを高く制御するためには負荷率の変化への対応が必要となり、そのためには定格容量が異なる少なくとも2機種をHPを組み合わせての制御あるいは稼働台数を制御することが望まれる。

◇改善策3：HPと太陽熱の蓄熱・利用技術のハイブリッド方式を構築する。

設備容量を減じた場合の補完熱源として、また

暖房のベース熱源として太陽熱を蓄熱し、暖房熱源として利用するハイブリッド方式を構築する。これまでの太陽熱の蓄熱方法は、ハウス内空気から集熱していた。例えば25℃以上の換気が必要になるような天候条件において蓄熱が可能とされていたが、これでは集熱可能な天候に限られる。昨年筆者らはハウス上部構造材の温度がハウス内で最も高温になることを確認した⁴⁾。この知見に基づけば、冬期における太陽熱の蓄熱可能日数と時間帯を飛躍的に増加できる見通しであり、一層の節電が期待される。現在、天井部の「梁」などの構造材上部における蓄熱、集熱法について実験中であり、後日紹介予定である。

◇改善策4：太陽熱の内部蓄熱量を熱源とする水-空気式HPを一部設置する。

多数のHPを設置する場合、昼間蓄熱した熱量の使い方の1つとして、一部HPの熱源として断熱水槽内の水に蓄熱された熱を利用することが考えられる。空気熱源式HPの場合、外気温の低下やデフロストによりCOPが低下するが、蓄熱された水温の30～40℃ほどから凍るまでの水温域を対象として利用可能になることから、HP全体の総合的なCOPの改善が可能と考えられる。とくに、HPでは工事費と効率の関係から屋内機と屋外機を近接させる必要があり、HPのハウス中央部への設置は行われていない。しかし、断熱水槽と水-空気式HPの使用により可能となり、現在施設中央部に見られる気温の低下の改善策にもなる。

◇改善策5：HPの多機能性の活用と一層の節電対策を講じる。

トマトの夏期夜間冷房により可販率が倍増したとの成果が紹介されている⁵⁾。一方、夜間冷房に際しての節電対策として、日射反射率が高く断熱性に優れた床面シートの選択と、日没時前後における床面への散水と換気による冷却により、上向きの地表伝熱量を抑制する方法を併用する効果について実証中である。

以上、HPの普及・拡大のための諸課題に関する改善策の詳細について順次報告するとともに、それぞれの改善策に関する関連情報について紹介する予定である。

本号では、改善策1に関する成果について報告する。

普及・拡大のための改善策 1

HPの設置台数を削減し初期投資額の負担を軽減 —暖房設備容量の決め方について—

1. 背景・方法

園芸施設の暖房設備容量は、「施設園芸・植物工場ハンドブック」など多くの資料に詳述されている方法により算出されている³⁾。設備費が比較的安価な暖房機の場合は、暖房設定値に制御するための暖房設備容量を決めるこれまでの方法で問題はなかった。

HPの本体価格は、単位発熱量当たりでは暖房機の4～5倍高いこと、HPの場合は比較的小容量のHPを多数設備することから、適正な暖房設備容量に調整しやすいこともあってより厳密に決める必要がある。

最大暖房負荷の算出には、現地もしくは最寄り地点の日最低気温データが不可欠である。これまでの設計外気温は、「数年に1度生じる最低外気温とする」とされており、数年間の極値を使用することが多かった。その点、内外気温差1℃当たりの本体価格が比較的安価な暖房機では、それほど問題にされなかったが、HPの場合は内外気温差に比例して所要台数が比例して増加することと、極温に近い外気温の発生頻度は低いことを勘案し、これまでの設計外気温より数度高めに見積もり、HPの台数を削減することについて検討している。当然、HP台数の削減により、極温またはその温度に近い気温になった時は、熱量不足となり、暖房設定値に維持できないことになるが、その補完については作物の温度に対する反応を考慮して、太陽熱の蓄熱利用（後日紹介予定）により補うことを考えている。

なお、この設計外気温を極温より高めにとるこ

とのメリットとして、図1-1に示す通り3点指摘できる。1点目は最大暖房負荷を小さくすることにより、HPの容量または台数を減らすことができ、設備費を節減できる。2点目は設備容量の減少は電気の基本料金の節減をもたらす。さらに、3点目は設備容量の減少は、HPの定格熱出力が発生頻度のより高い暖房負荷に近づくことにより負荷率が改善され、その結果、COPの改善、消費電力量の節減となり、従量料金の低減をもたらすことが期待できる。すなわち、設計外気温を高めを設定することは、HPの設備費の節減、電気料金については基本料金と従量料金の双方の節減効果をもたらすことになる。

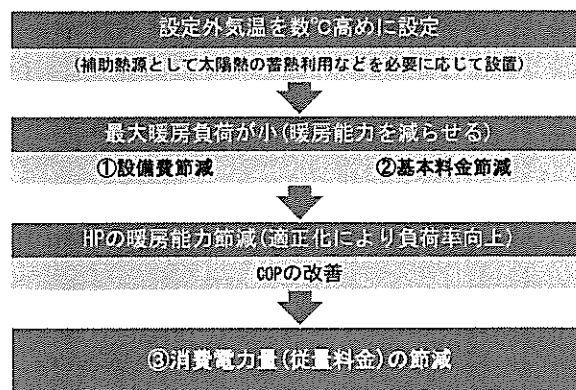


図1-1 設計外気温を高めを設定することによる3つのメリット

最大暖房負荷の算出には、数年間の冬期の日最低気温データが必要となる。例として図1-2に千葉県我孫子市のアメダスデータを利用した日最低気温と累積発生率のグラフを示した。図より明らかなように、極温に近い日最低気温の発生頻度は低い。このように低い発生頻度の時にだけすべてのHPがフル稼働して負荷率が高まる設備容量の決め方は、高価なHPの場合不適切と言える。改善案として設計外気温は、極温ではなく極温より2～6℃程度高めとして、設備容量を削減する案である。2～6℃の具体的な選択は、栽培作物の耐低温性によって調整する必要がある。設計外気温を高めにするのは、図1-1に示すように初期投資額と基本料金の負担を節減するとともに、後述のとおりHPの標準

出力に近い状態における稼働割合が高まり、COPが改善され消費電力量が節減される。

◇説明1：HP台数と基本料金の節減効果について

暖房装置の設備容量は、最大暖房負荷を目安として決められる³⁾。最大暖房負荷(Qg、単位W)は、最寒時間帯の貫流伝熱負荷(Qt)、隙間換気伝熱負荷(Qv)および地表伝熱負荷(Qs)をそれぞれ加算して求めることができる³⁾。

$$Qg = (Qt + Qv + Qs) * fw$$

$$Qt = Ag * ht * (\Theta_c - \Theta_{ou})$$

$$Qv = Ag * hv * (\Theta_c - \Theta_{ou})$$

$$Qs = As * qs$$

fw：風速に関する補正係数(1から1.1)、

Ag：施設被覆面積(m²)

As：施設床面積(m²) Θ_c ：暖房設定値(°C)

Θ_{ou} ：設計外気温(°C) 数年間に1度生じる最低外気温を用いる。

ht：熱貫流係数(W・m⁻²・°C⁻¹) hv：隙間換気伝熱係数(W・m⁻²・°C⁻¹)

qs：単位床面積当たりの地表伝熱量(W・m⁻²)

最大暖房負荷は、暖房設定値と設計外気温の差に、施設被覆面積や熱貫流係数などの比例定数を乗じて求められ、設計外気温をどのような値にするかは大きな影響がある。

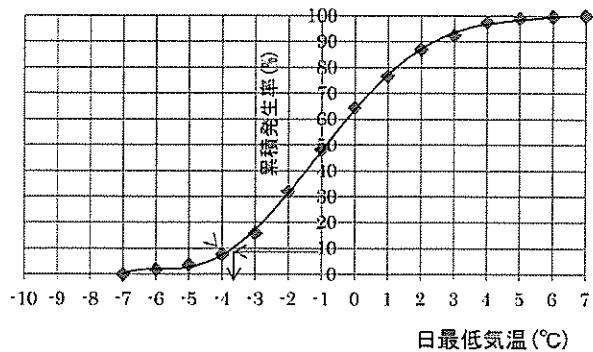


図1-2 1～2月における日最低気温の累積発生率曲線(千葉県我孫子市(アメダス)、2008～2012年の5年間平均)

次に日最低外気温の発生状況を図1-2に示した。図1-2に示すように極端な低温日の発生頻度は比較的低いことから、設計外気温を2～6°C高めに設定することにより、HPの設備容量を削減するとともに、HPの標準的な暖房能力に近い条件における稼働率を高め、結果的にCOPを改善する。なお、設計外気温を高めに設定することにより、熱量不足の日が3～12日生じることになるが、その補完には太陽熱の蓄熱利用が適切と考えている。この太陽熱の蓄熱利用は、極端な低温時のみではなく暖房期間すべてにおいて利用可能であり、以上説明した従量料金をさらに節減できると考えられる。

表1-1は、設計外気温を5年間の極温にする場合と、2～4°C設定外気温を高めた場合の必要

表1-1 設計外気温が最大暖房負荷(算定値)、必要設備能力、HP台数および基本料金に及ぼす影響⁷⁾

設計外気温		最大暖房負荷(kW) (A)	必要設備容量(kW) (B=A・3)	必要HP台数 (C=B/6)	基本料金(年間分)	
条件	日最低気温(°C)				金額(千円)	2011～2015年5年間極温の場合との比
5年間極温	-6.9	283	95	16	1,460	1.00
許容発生率5%	-4.6	254	85	15	1,370	0.94
許容発生率10%	-3.7	242	81	14	1,280	0.88
許容発生率20%	-2.7	229	77	13	1,190	0.81

注1 最大暖房負荷の算出条件

・暖房負荷係数：6.6(W・m⁻²・°C⁻¹) ・被覆面積：3,564(m²) ・暖房設定温度：15(°C)

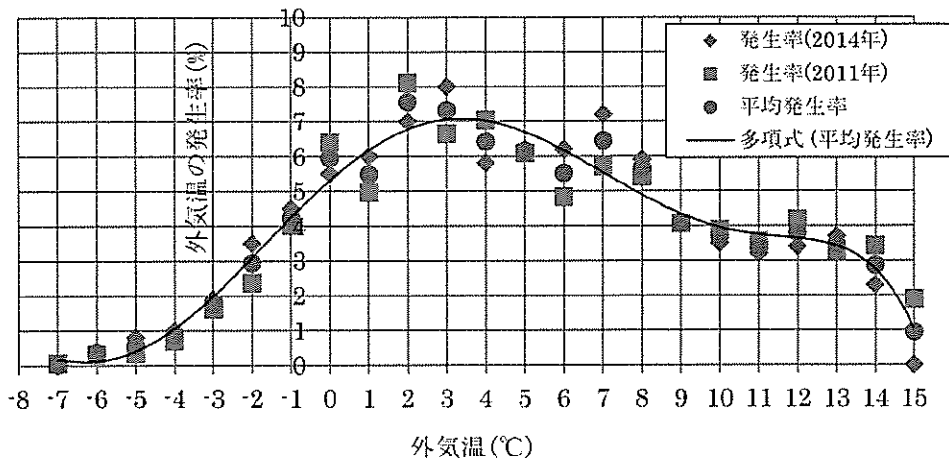
・熱節減比：0.45 ・外気温データ：図1-2を使用

注2 ヒートポンプ仕様：定格消費電力6kW COP 3.0

注3 電気の基本料金は、東電「高圧季節別時間帯別電力A」、1,269円・kW⁻¹(2014年当時の料金)で算出。

注4 基本料金年間分は、HPの消費電力(1台6kW)として算出。

注5 許容発生率とは、図1-2の日最低気温の累積発生率曲線において、室内気温が暖房設定温度を下回ることを許容する日数を百分率(60日が100%)で示した値。許容発生率10%は6日暖房設定温度を下回ることを意味する。



$$y = -6E-6x^6 + 8E-5x^5 + 1.3E-4x^4 - 0.02x^3 - 0.09x^2 + 0.98x + 5.31$$

$$R^2 = 0.96$$

図1-3 暖房期間（11月から翌年4月）の外気温発生状況⁸⁾
 (千葉県柏市、2011年と2014年の2年間の平均値)

HP台数と基本料金とその比の節減の程度をまとめたもので、4℃ほど高めることによって、必要HPの台数は3台/25a節減され、基本料金は20%ほど節減される。

なお、その他の地点における同様の調査結果（許容発生率20%の基本料金の節減比千葉県孫子市の場合0.81に対し、宮崎と豊橋では0.77、宮城県亘理町では0.74、岩手県宮古市では0.82と算出されており、それぞれほぼ同様の効果がみられた。

◇説明2：設計外気温を高めを設定することによる従量料金の節減効果について

暖房装置を一定期間使用する場合の燃料消費量の見積もりは、対象期間における期間暖房負荷を算出して行うことができる⁸⁾。HPの場合の期間暖房負荷は、内外気温差によって負荷率が変化し、COPも変化するので、暖房期間中の暖房時間（16時～翌10時の18時間）について、1℃刻みの外気温（内外気温差）の総時間数を求め、負荷率とCOPの関係から、設計外気温を極温にした場合と4℃高めにした場合の暖房期間におけるそれぞれの消費電力量を算出し比較した。

期間暖房負荷の算定には、時間経過にともなう外気温データが必要であり、日最低気温のデータでは不十分であり利用できないので、千葉県柏市

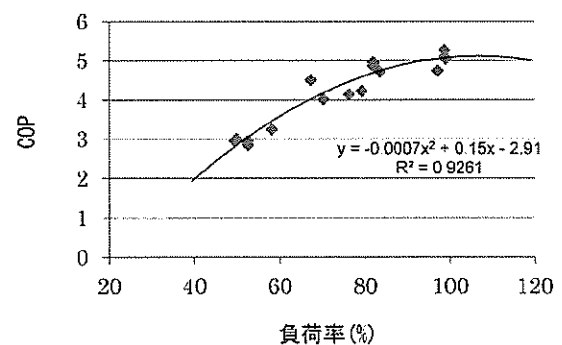


図1-4 HPの負荷率とCOPの関係⁸⁾（人工光型植物工場における測定結果）

で測定した1分間隔の実測データを利用した（図1-3）。商品化されているHPの負荷率とCOPの関係は、ほとんど公表されていないようで、今回の計算には図1-4に示した人工光型植物工場で得た負荷率とCOPのデータを使用した⁸⁾。

図1-3と図1-4に示した回帰式を利用して、設定外気温を-7℃から-3℃に4℃高めた場合について、それぞれの条件における暖房期間の消費電力量を算出し表1-2に示した。

表1-2により設計外気温を-7℃から-3℃に4℃高めることによって、HPの最大暖房能力の小さなHPを利用することが可能となり、HPの負荷率が改善される。負荷率が高まると図1-4によりCOPが改善され、その結果、暖房期間における消費電力量が15～16%節電される見通しを得た。

表 1-2 設計外気温を変えた時の消費電力量に及ぼす影響⁸⁾

設定外気温	暖房期間における消費電力量 (kWh)	HP 以外熱源の必要熱量 (kWh)
① -7℃として暖房設計	18,990 (100.0)	0
② -3℃として暖房設計 (HP の過負荷利用)	16,199 (対①比 85.3%)	0
③ -3℃として暖房設計 (熱量不足時にはその他熱源利用)	15,853 (同上 83.5%)	1,771

計算条件

- ・床面積 250 m² ・被覆面積 524 m² ・暖房負荷係数 6.4 W・m⁻²・deg⁻¹ ・熱節減比 0.4
- ・ヒートポンプの COP 3.0 ・設定温度 15℃
- ・外気温データ千葉県柏市
2012年11月～2013年4月と2014.11～2015.4の下旬値の平均値図1-2を使用。
- ・HPの負荷率(最大暖房熱量に対する暖房熱量の比)とCOPとの関係には図1-3を使用。
- ・暖房期間は11月から翌年4月の6ヵ月とした。

HPのCOPは、内外気温差とHPの負荷率の使用条件によって変化する。内外気温差は、暖房設定温度が一定であっても、外気温が低くなると大きくなる。HPの負荷率は発生熱量がHPの定格能力の70%程度のところを最高値を示すことが多いとされているが、負荷率とCOPの関係データはほとんど公表されていないため、ここでは、図1-3の実測データを使用して、設定外気温の取り方による負荷率とCOPさらに消費電力量の推定を行った。

その結果、使用したデータの条件下において、設計外気温を-7℃から-3℃に4℃高めて、設備容量を小さくし設定することにより、15～16%の消費電力量が節電されることがわかった。なお、この設定外気温を高めにとることによる諸効果は、今回使用したデータの範囲に止まることなく、図1-3と図1-4の内容によってその程度は変化するが同様の影響が一般的に見られると考えている。

HPの負荷率及び外気温に関するデータはほとんど公表されていない。各社のHPを効率的に利用するためには、これらのデータに基づいて利用することが重要であり、HPの効率的な利用を促進するために関係各社の協力をお願いしたい。

<謝辞>

農業用ヒートポンプ分科会において、2013年から4年にわたり討論に参加していただいた会員の皆様に対し、また、実験の場を提供された旧みらい(株)ならびに(株)霧のいけうちの両社と協力いただいた両社の担当者諸氏に深謝します。

<引用文献>

- 1) 林真紀夫・古在豊樹・中村潤・渡部一郎(1983): 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, 379-387.
- 2) 古在豊樹・権在永・林真紀夫・渡部一郎(1985): 温室の冷房負荷に関する研究(1)夏期夜間の負荷特性, 農業気象, 41-2, 121-130.
- 3) 日本施設園芸協会編(2015): 施設園芸・植物工場ハンドブック, 123-126, 149.
- 4) 古在豊樹・関山哲雄(2016): 園芸施設内上部空間の昼間気温が下部空間の気温より高い原因について, 農業電化, 69-4, 16-20.
- 5) 大石直樹・守谷栄樹・木村真浩(2015): ヒートポンプによる夜間環境制御の効率化を目指した温室の冷暖房負荷削減システムの開発, 農業電化特集号, 66-6, 14-18.
- 6) 三原義秋編(1980): 温室設計の基礎と応用, 養賢堂, 185-186.
- 7) 関山哲雄・玉城鉄・三澤俊哉(2014): 園芸施設におけるヒートポンプ設置マニュアルの策定を目指して(2), 農業電化, 67-7, 11-15.
- 8) 関山哲雄・古在豊樹(2015): 園芸施設の空調にヒートポンプを使用する場合のコスト削減に係わる課題(中間報告), 農業電化, 68-2, 12-16.

