

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 2 ヒートポンプの電力利用効率を高める制御法

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

園芸施設に使用されている暖房機のほぼ90%は油炊き暖房機であり、電気式ヒートポンプ（以下HPと略す）は、農水省の補助事業などによりようやく暖房機の8%ほどに達したと言われている²⁾。油炊き暖房機に関しては、①燃料エネルギーの利用効率において限界があり、また②灯油・重油などの燃料価格が不安定である。さらに、③暖房機から排出されるCO₂ガスの抑制対策や④施設内環境条件のより高度な制御（冷房、除湿）を行うニーズの高まりなどから、最近では油炊き暖房機に代わって園芸施設用HPの普及・拡大が期待されている。しかし、実態は厳しい状況である。その理由については前報において、HP本体や関連施設の価格が高いなど5つの課題を指摘した⁶⁾。それらの課題の解決には、製造・販売などにたずさわる供給側におけるコストダウンに関する努力は勿論であるが、「NPO植物工場研究会」では、利用者側の課題としてHPの効果的な利用によりHPの必要台数を減らす方策や、HPの効率的な利用により電気料金を節減するなどの改善策について検討し、前報で紹介した⁸⁾。

2. 背景と方法

「NPO植物工場研究会」は、千葉大学柏の葉キャンパス内において、人工光型植物工場（以下、人工光型）と太陽光型植物工場（以下、太陽光型）に関する技術開発や経済性の改善のための実証など、実用化を推進するための研究活動を行っている。

る。HPは人工光型では冷房が不可欠であり、太陽光型においても暖冷房・除湿などを行う重要な機器であり、また、園芸施設一般においても、生産物の品質向上や増収対策、節油対策さらには環境対策としても注目されている^{4),5)}。そのようなことから、HPの効果的な利用法などに関する調査・研究を分科会活動として平成25年4月から行っている。

前報では、油炊き暖房機などのこれまでの設置計画では、油炊き暖房機そのものが比較的安価であること、また、数年に一度の夜間の低温でも室内を設定値に制御することへの利用者のこだわりが強く、暖房能力に余裕がある設置計画が多いことを指摘した。一方、HPの場合は発熱量当たりの機器購入価格が油炊き暖房機より4~5倍も高いうえに、HPを使用しない夏期にも電気の基本料金を支払わなければならない。その対策として暖房設計外気温を従来よりも数℃高めに設定することによりHPの暖房能力を控えめにすることで、機器購入価格を節減するとともにランニングコストも低減できる可能性について報告した^{6),7) および8)}。

HPにより園芸施設用の暖冷房を行う場合は、複数台のHPを用いるのが一般的である。暖房時のHPのCOP（成績係数=暖房発熱量/消費電力量…1式）を高くして節電効果を高めるには、HPの暖房負荷特性に合わせてHPを制御することが必要である。

本報の以下では、人工光型と太陽光型で実施したそれぞれの場合における、電気式HP（空気熱源式）に関する実験結果を紹介する。

人工光型（総床面積 406m²、栽培室床面積 338 m²）においては、7 台の HP（定格消費電力 9.1 kW 4 台、同 7.4 kW 3 台）を対象として、照明施設などの消費電力量に対する平均 COP の変化状態を夏期と冬期において測定した。

太陽光型（床面積 243m²、被覆面積 524m²）においては、2 台の HP（定格消費電力 6 kW と 5 kW の HP 各 1 台）を対象として、2 つの制御法において平均消費電力量と平均 COP の違いなどについて測定、検討した。なお、2 つの制御法について実験できるように簡易な制御器を試作した。試験はいちごを栽培している施設において、施設内気温と外気温および暖房時間帯における消費電力量を測定し、平均 COP ついて比較した⁷⁾。その比較は、園芸施設の暖房熱量の推定に使用される、「暖房時間における室内外気温差の積算値と暖房熱量は比例する」との考えに基づいて行った³⁾。室内外気温差の積算は、室内外の気温が比較的安定している日の夜間 2 時間と 12 時間（18 時から翌朝 6 時）について行った。

太陽光型における制御法には、制御対象とする HP（今回の試験では前述の 2 台）を施設内気温が暖房設定値を下回った時に 2 台同時に稼働させ、暖房設定値以上では同時に停止する方法（ここでは一括制御法と呼ぶ）を従来型の制御法とし、もう一つは今回試行した内外気温差適応制御法とした。人工光型における測定はすべて従来型の制御法で行った。

3. HP の COP に及ぼす要因

油炊き暖房機の発生熱量は、外気温や施設内気温による影響はほとんどない。電気式 HP の場合、例えば COP が、3～5 というと、消費電力量の 3～5 倍の暖房発生熱量が得られることが大きな特徴ではあるが、次の 2 つの要因の影響を受けるので、効率的な利用を図るには次の 2 点に留意する必要がある。

① 広く使用されている空気熱源式 HP の COP は、外気温と室温の差によって影響される。暖房で室温が一定の場合、外気温が低くなると COP は低下し、高くなれば上昇する。冷房の場合はその逆となる。

② COP は負荷率（所定温度に維持するために必要な熱量の、HP の定格暖冷房能力もしくは最大暖冷房能力に対する比率で、部分負荷率と呼ぶこともある）によって影響される。

以上のことから、HP の COP が高い状態で暖冷房するには、人工光型においては内部発生熱量の変化に適応させて、また太陽光型では外気温の変化に適応させて HP の稼働台数や総暖冷房能力を制御することが求められる。

説明：HP の COP は図 1 に示すように、① 内外気温差、② HP の負荷率（その意味は上述）の 2 つの要因の影響を受けることが指摘されている¹⁾。

人工光型では、照明電力と培養液の循環ポンプなどの電気機器からの発生熱量を、HP を使用して外部に放熱し、内部温度を所定の温度に制御しているが、照明機器などからの発生熱量と HP の消費電力量のいずれも容易に測定でき、COP は前述の 1 式により算出している。

図 1 から内部における発生熱量が小さくなった場合も HP の能力をそのままにしていると、冷房負荷率が小さくなり COP が小さくなる。また、冷房負荷率が一定で室温が一定だと外気温が低い冬期における COP は、外気温が高い夏期の COP よりも高い。それは外気温が低いと、内外気温差が大となるからであり、さらに建屋からの放熱量の増加により冷房負荷が低下するためである。

一方、太陽光型では、夜間暖房時の内部からの発生熱量は HP など暖房機のほか、地表面からの地表伝熱量とポンプ類などからの発生熱量からなり、前述の 1 式は次のように示される。

$$\text{COP} = (\text{HP の発生熱量} + \text{地表伝熱量} + \text{ポンプ類などの発生熱量}) / \text{HP の消費電力量} \cdots 1 \text{ 式}$$

しかし、HP の発生熱量の正確な実測は困難なこ

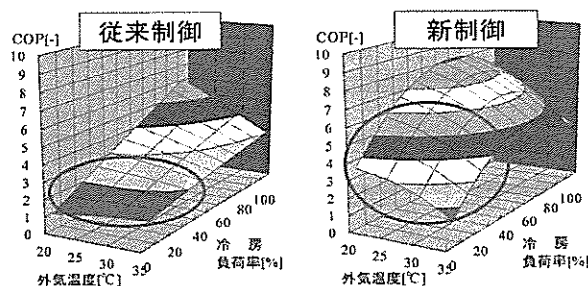


図 1 HP の COP に及ぼす外気温と負荷率の影響¹⁾

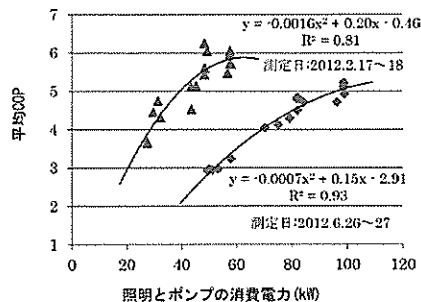


図2 人工光型における内部発生熱量による平均 COP の変化

とから、外気温が安定し室内気温が一定に制御されている平衡条件においては、HP の発熱量 + 地表伝熱量 + ポンプ類などの発熱量 = 放熱係数 × 被覆面積 × 内外温度差 × (1 - 熱節減比) …… 2式

2式の右辺の内外気温差以外は定数であることから、一定時間における内外気温差の積算値を求め、その値に比例定数を乗じて平均暖房熱量とし、HP から放出される本来の熱量に地表伝熱量 (HP 室内機のファンおよびポンプ類などの熱量については無視した) を含めた状態における平均 COP を、1”式により求め、参考までに別途地表伝熱量の測定値を差し引いた値を示した。

$COP = \text{放熱係数} \times \text{被覆面積} \times \text{内外温度差} \times (1 - \text{熱節減比}) + \text{地表伝熱量} / \text{HP の消費電力量} \dots\dots 1”式$

今回の太陽光型における測定結果は、HP の発熱量に地表伝熱量とポンプ類などの発熱量を含めた状態で測定しており、COP の表示はそのまま地表伝熱量を含めた値と、地表伝熱量の一般値を差し引いた値を参考までに併記している。

4. 人工光型と太陽光型における COP の変化状況

人工光型において複数の HP を用いて冷房運転する場合の負荷率と平均 COP との関係は、複数台の定格負荷の総計値とその 30 ~ 50% 減程度の範囲において高く、それ以下になると急激に低下する。この結果から、人工光型において節電効果を高めるためには、照明機器の稼働状況に連動した HP の稼働台数制御または、冷房能力調整を適切にする装置を使用する必要がある。

太陽光型および園芸施設一般において HP に

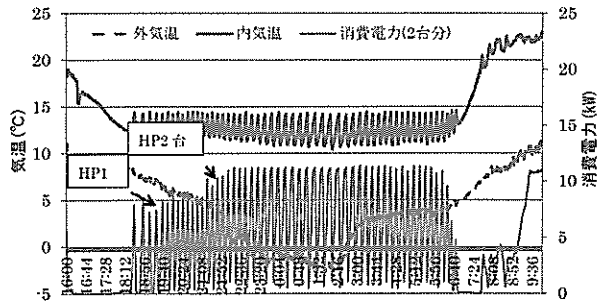


図3 内外気温差適応制御法の制御状況 (2015.3.11 ~ 12) (外気温によって HP を選択制御している)

より暖房する場合は、内外気温差による影響が大きいことから、節電効果を高めるには、内外気温差に適応した台数制御または出力調整機能の装備が必要である。

説明：人工光型植物工場における複数台 HP の消費電力と平均 COP に関する測定結果を図 2 に示した。

測定に供した人工光型の照明器具には白色蛍光灯を使用しており、栽培架台ごとに時刻によって点灯、消灯を行い結果的に点灯総数が変化した。室内気温は一定値 (約 21°C) に制御されており、白色蛍光灯と循環ポンプの発熱量の変化に応じて HP の冷房出力が調整されていた。そのような状態において、白色蛍光灯と循環ポンプならびに HP の消費電力量を測定した結果、定格値とその 70% 程度の範囲において高い COP を示した。COP は夏期より冬期において高くなった。なお、照明電力量 (電気エネルギー) のうち、植物に化学エネルギーとして固定される数%を除く 95% 以上は、最終的には冷房負荷 (熱エネルギー) となる。

夏期と冬期における栽培架台数が異なり消費電力に差があるが、冬期における COP は夏期の場合より明らかに高くなった。夏期と冬期のいずれでも定格値とその 70% 程度の範囲において、高い COP を示した。

太陽光型や園芸施設一般の暖房では、夜間の暖房熱量に対する被覆面からの放熱量に大きく影響する要因は、室内外気温差である。これは、人工光型に比べると温室被覆の断熱がかなり不良であることによる。

図 3 は内外気温差に基づく制御法の制御状況で

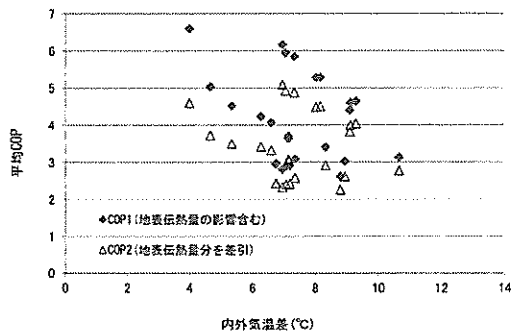


図4-1 内外気温差制御法における内外気温差と平均COPの関係の測定例

あり、外気温の低下によってHPの稼働台数が1台から2台に切り替わり消費電力が変化している様子を示している。なお、これまで行っているほとんどの測定データにおいて、消費電力はこのような激しく変化しており、インバーター機能が活かされていないように思われ、COPを下げている可能性がある。この影響を明らかにするためには、COPの直接測定が必要であり、今後試みる予定である。

また、今回供試した2台のHPの定格消費電力が5kWと6kWで両HPの暖房能力が近接していたために、3つの暖房能力レベルによる結果ははっきりとはみられなかったが、例えば3kWと6kWというような組み合わせであれば、3通りの組み合わせ(3,6並びに9kW)が可能となり、よりきめ細かな適応制御が可能になり、その節電効果の検証が必要である。

つぎに、2つの制御方法に関する内外気温差と平均COPの関係について比較するために、前述の1”式により2時間単位での内外気温差の積算値と消費電力量との関係について整理し、その結果を図4-1と図4-2に示した。なお、地表伝熱量をHPの発熱量に含めた影響は、地表伝熱量を含めて求めたCOPと、別途施設においてこれまでに測定した結果に基づいて地表伝熱量を $10 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ と仮定して差引いた場合との差をみると、COPの値で0.7～1.1程度(内外気温差が $7.4 \sim 8.8^\circ\text{C}$ の場合)の影響を及ぼしている(表1)。

2つの制御法の負荷率の違いを両図のグラフから判別するのは難しいが、後述の表1によると内外気温差適応制御法による平均COPが一括制御法(従来法)のそれに比べ、0.7～1.1ほど高く、

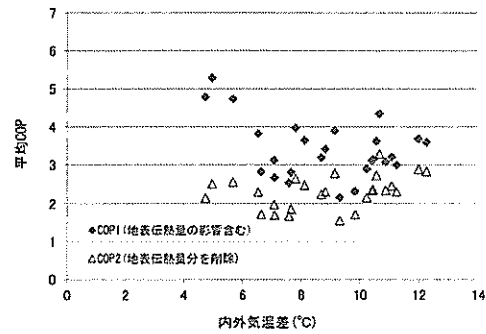


図4-2 一括制御における内外気温差と平均COPの関係の測定例

平均COPのレベルを全体的に引き上げている。また、内外気温差適応制御法では個々の測定データが2～3つのグループに分かれ、一括制御の場合に比べ、それぞれの平均COPはやや高い値を示しており、外気温によってHPを選択、制御する効果の表れと考えられる。

なお、この太陽光型における平均COPの算出に使用した暖房熱量は、暖房時間帯における内外気温差の積算値に施設の定数を乗じて求めているが、比例定数は $2012 \text{ W} \cdot \text{°C}^{-1}$ として使用した。その詳細は、被覆面積 $524 \text{ (m}^2\text{)}$ 以外の、放熱係数は $6.4 \text{ (W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C}^{-1}\text{)}$ 、保温カーテンによる熱節減の係数は0.6(熱節減比:0.4)は、文献2)において紹介されている一般的な数値を使用した。

5. 人工光型と太陽光型におけるHPの制御法と節電効果

人工光型および太陽光型の施設内の暖冷房をHPにより行う場合、できる限りCOPが高くなるように制御することが節電上必要である。

人工光型では、照明機器と循環ポンプなどの発熱量に見合う冷熱量になるようにHPを制御することが肝要であり、比較的簡易な制御装置でも十分な効果が期待できる。

太陽光型においても基本的には、負荷率を高く維持する制御法の適用が必要である。

とくに、日没と日の出時前後に生じる比較的小さな内外気温差(5°C 以下)の発生頻度が比較的高いことから、この内外気温差の範囲の負荷率を高めるためのHPを準備することが節電上重要であり、HPの台数制御、さ

らには発生熱量が異なる2種のHPによる組み合わせで外気温（内外気温差）に応じて3段階程度に分けて制御することが、COPを高くする実用的な制御法と考える。

説明：太陽光型における制御法は、一括制御法に比べ、内外気温差適応制御法のCOPのレベルが全体的に高く、表1によると0.7～1.1程高まり、また表2に示した1日当たりの消費電力量で比較すると、23%ほどの節電効果が示された。

人工光型については、今回考察した方法による節電効果に関する実験を行うことはできなかったが、内部発熱量に応じてHPの稼働台数あるいは冷却能力を制御する方法により、現状より15～25%程度の節電効果が期待できると推察した。

以上、農業用HPの普及・拡大を目標として、その普及を妨げていると思われる課題の改善に向けて、これまでの成果を前号から紹介している。まだ実用規模における実証は十分とは言えない段階ではあるが、今後さらに内容を充実させてHPの普及・拡大に向けて役立たせるために、皆様からの情報提供や意見をお待ちしています。

次号は、HPの必要台数をさらに節減してインシアルとランニング双方のコスト低減をねらいとして、太陽放射による昼間の余剰熱を蓄えて夜間に利用する方法と、地表伝熱量の季節ごとの変化とその活用について紹介する予定である。

[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する。

<引用文献>

- 1) NEDO (2014)：次世代型ビル用マルチヒートポンプシステムの革新的省エネ制御の研究開発，研究評価委員会発表資料（公開），Ⅲ-62.
- 2) 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.
- 3) 三原義秋編（1980）：温室設計の基礎と実際，養賢堂，185-186.
- 4) 古在豊樹（2009）：太陽光型植物工場，オーム社，55-79.
- 5) 古在豊樹（2012）：人工光型植物工場，オーム社，178-182.
- 6) 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.
- 7) 関山哲雄・古在豊樹（2016）：園芸施設用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（第2報），6農業電化，69-3，6-10.
- 8) 関山哲雄・古在豊樹（2017）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とその改善策，70-4，農業電化，6-12.

表1 太陽光型における2つの制御法のCOP（積算時間2時間）

	平均室内 気温 (°C)	平均外 気温 (°C)	平均内外 気温差 (°C)	平均暖房 熱量 (kWh)	平均消費 電力量 (kWh)	平均 COP	
						地表伝熱分含む	地表伝熱分差引
内外気温差 適応制御法	11.4	4.0	7.4	29.7	7.9	4.1	3.4
一括制御法 (従来法)	11.9	3.1	8.8	35.5	11.0	3.4	2.3

内外気温差制御法 測定期間：2015.1.26～3.7間の25データ
 一括制御法 測定期間：2014.2.7～10、2015.3.20～25間の25データ

表2 太陽光型における内外気温差適応制御法め節電効果（積算時間12時間）

	平均室内 気温 (°C)	平均外 気温 (°C)	平均内外 気温差 (°C)	平均暖房 熱量 (kWh)	平均消費 電力量 (kWh)	平均 COP	
						地表伝熱分含む	地表伝熱分差引
内外気温差 適応制御法 (内外気温差を 同じに補正)	13.0	6.1	6.9 (6.3)	166.9 (151.1)	39.2 (35.5) 従来法に比べ 23%減	4.3	3.5
一括制御法 (従来法)	12.8	6.5	6.3	151.1	46.1	3.3	2.9

内外気温差適応制御法 2015.3.6～9日、13～15日 計7日
 一括制御法 2015.3.20～25日 計5日
 暖房時間（積算時間）：18時～翌日6時の12時間