

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3 「余剰太陽熱を蓄熱し暖房補助熱源として活用」(その1)

関山 哲雄・古在 豊樹

特定非営利活動法人 植物工場研究会

玉城 鉄

イワタニ アグリグリーン(株)

1. 背景・方法

温室やハウスなどの園芸施設の暖房には、設備費が安価なこともあって約95%が化石燃料を消費する油炊き暖房機(温風式90.5%、温水式4.7%)が用いられている¹⁾。しかし近年、化石燃料の燃焼に伴う温室効果ガスの排出を削減する機運が高まっており、施設園芸においても、また、これからの太陽光型植物工場においても、より環境にやさしく持続可能な暖房方法に切り替えることが望まれている。

今後の暖房方法は温室効果ガス排出量が少なく、エネルギー利用効率が高いヒートポンプ(以下HPと略す)に変える必要性について多くの関係者から指摘されてきたが、現状はHPの設置費ならびに電気代(基本料金と従量料金)が高いことからその普及が伸び悩んでいる。

そこで、当特定非営利活動法人植物工場研究会内の農業用HP分科会では、HPの普及・拡大を意図した調査活動を4年間にわたり実施した結果、①HPの一層効果的な利用と、②太陽熱の余剰熱を蓄熱し暖房の補助熱源として活用することにより従来のHP設置費と電気代を半減できる見通しをつけ、そのために必要となる関連技術の開発を行っている。

①に関しては、改善策1として設計外気温を4℃

ほど高めにしてHPの設置台数を削減する方法について、さらに改善策2として外気温に応じて異なる容量のHPを設置し、それらの運転を適切に制御することでHPのCOPを常時高い状態で稼働させることにより、総合的なCOPを改善し、従量料金を節減する方法について本誌7月号と9月号において紹介した^{2),3)}。

②に関しては、①の設計外気温を高めにするにより生じる不足熱量を冬期の余剰太陽熱を蓄熱し、夜間における補助熱源として利用するとともに暖房全期間のベース熱源としても利用する。

太陽熱を蓄熱し夜間の暖房熱源として利用する方法については、1980年代のオイルショック当時から多くの研究がなされてきたが、その多くは、栽培空間に例えば、空気-水の熱交換機を設置したり、潜熱蓄熱材を利用する方法が検討された⁴⁾。いずれも栽培空間における集熱であり、栽培適温(一般的には冬期の昼間気温は20~25℃前後)の制約から、蓄熱材の温度が20~25℃に上昇しても、暖房設定温度を15℃とすると、暖房に利用できる温度幅は5~10℃の範囲となり、結果的に蓄熱量は限定され、本格的に普及するまでには至らなかった¹⁾。

そこで、HPと太陽熱を蓄熱し夜間の暖房熱源として利用する装置との組み合わせシステムの構

築にあたって、まず、園芸施設上部の骨材やその周辺の気温が50℃近い高温になっている結果⁵⁾の適用を考えることとした。この結果は2016年3月に測定したことから、まず厳寒期の1月～2月における温度状況を確認する必要があり同様の測定を行うとともに、その結果の各地域への適用性について検討した。

併せて、同様の太陽熱利用である地表伝熱量の大きさと季節による変化について紹介する。

なお、ここで使用する余剰太陽熱とは、昼間の施設内気温を一定温度に維持するために必要な熱量以上の太陽熱を意味することとし、その算出は1日当たりの全天日射量から昼間の施設内温度を所定の温度に維持するために必要な単位床面積当たりの暖房負荷量を差し引いた値としている。

2. 余剰太陽熱を暖房補助熱源として活用

これまでよりも高い温度が得られる集熱場所として、園芸施設上部の骨材やその周辺の空間の適用を考え、集熱場所としての実用性について検討するため、2017年1～2月の厳寒期における測定を行った。

また、わが国においてこの余剰太陽熱の適用地域に関する検討結果について述べる。

余剰太陽熱の集熱に適した場所に関する実験方法は既報⁵⁾のとおりであるが、要点のみについて再掲する。

- a. 場所・時期：千葉県柏市、千葉大学柏の葉キャンパス内植物工場、2017年1月中旬～3月上旬
- b. 供試植物工場：イワタニ アグリグリーン(株)がトマトの多段栽培を周年実施中、床面積2,430㎡
- c. 日射測定器：プリード製、PCM-01型、感度7μV/W/㎡
- d. 日射の測定場所：室内中央部「梁」（高さ床面上4m）の上面
- e. 温度測定場所：①室内中央部「梁」の温度とその周辺気温（熱電対利用）、②ハウス中央部

1.5mの気温（通風型）

f. 温度測定方法：①熱電対（T型、0.1mmφ）、プラスチック製放射よけを設置、②通風型か温湿度計（チノ製）

以上の実測結果と余剰太陽熱を蓄熱し、利用する方法の実地への適用性に関する検討結果を要約すると以下のとおりである。

千葉県柏市に設置されている太陽光型植物工場において、トマトの多段栽培中において、梁の上面における日射束密度と温度ならびにその周辺気温を、1月中旬から2月末にかけて47日間連続測定した結果、梁の周辺気温の日最高気温が40～50℃を示したのが41日間、30～40℃を示したのが4日で悪天候のため30℃以下であった日数は2日であった。この結果から、同集熱場所は厳寒期においても利用価値が高くかつ比較的安定した集熱場所と考えた。なお、室内中央部の気温により天窓の開閉を制御しており、開時には梁の周辺気温は5～6℃程度の低下が観測されており、効率的な集熱を行うためには天窓開閉の制御方法についての工夫が必要となる。

この余剰太陽熱の利用が効果的に行える地域は、まず昼間の室内気温を適温に維持するための熱量を全天日射量で賄える必要がある。柏（千葉県）の供試施設の例においては、余剰太陽熱を蓄熱するには、全天日射量は最低約4.9(MJ・m²・day⁻¹)必要であり、約10.4(MJ・m²・day⁻¹)以上あると、暖房時間帯の暖房熱量を全量賄える可能性がある。そして暖房費を半減するためには、昼間の4.9(MJ・m²・day⁻¹)に暖房時間帯の半量に当たる2.8(MJ・m²・day⁻¹)を加えた7.7(MJ・m²・day⁻¹)の全天日射量が必要と考えられた。

説明：供試施設における太陽熱の集熱に適した場所として「梁」の周辺を選び、厳寒期における「梁」の上の日射束密度およびその周辺の気温を

測定した。結果を図1に示した。図1から1月中旬から3月上旬までの47日間のうち、30℃以上に達したのは45日間あり、そのうちの41日間の最高温度は40～50℃を示した。暖房設定値を15℃とした場合、従来の25℃までの上昇温度では利用できる温度幅は10℃であるが、45℃まで上昇した場合の温度幅は30℃となり、従来の場合の3倍となり、蓄熱量は3倍に増加する。また、集熱時間も10時から15時頃までは30℃以上となることが多く、5時間程の集熱が可能となる。

次に昼間とその他の暖房時間帯において、それぞれ適温に維持するために必要な熱量を試算する^{6),7)}。

$$\text{一夜当たりの暖房熱量 } Q_n \text{ (Wh} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$$

$$= a * A_g * D_n * (1 - f_r) - A_s * q_{sn} * h_n \quad (1)\text{式}$$

- a : 放熱係数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$)
- A_g : 施設の被覆面積 (m^2)
- A_s : 施設の床面積 (m^2)
- t_{cn} , t_{oun} : 夜間の設定気温と夜間の外気温 ($^{\circ}\text{C}$)
- q_{sn} : 夜間の平均地表伝熱束密度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
- f_r : 熱節減比
- D_n : 暖房時間帯の暖房デグリアワー ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} \cdot \text{day}^{-1}$)

h_n : 暖房時間帯の時間 ($\text{h} \cdot \text{day}^{-1}$)
 風速による補正係数は省略した。
 試算に用いた各値は次のとおりである。
 供試施設および施設の使用条件から、
 a : $6.6 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1})$ 、 A_g : $3,564 \text{ (m}^2\text{)}$ 、 A_s : $2,430 \text{ (m}^2\text{)}$ 、 t_{cn} : $15 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$ 、 f_r : 0.45 、
 h_n : 暖房されている実態から16時～翌日10時の18時間

2017年当地における最低外気温を記録した2017.1.15～16日の各測定値を使って、最大暖房負荷量を実績値に基づき算出した。

$$t_{oun} : -7 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

$$q_{sn} : 11 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

$$D_n : 277 \text{ (}^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$$

それぞれ(1)式に代入して

$$Q_n = 6.6 * 3564 * 277 * 0.55 - 2430 * 11 * 18$$

$$= 3,102 \text{ (kWh} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$$

この熱量を床面積当りに換算すると、 $4.6 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ 相当となる。図1の測定期間(2017.1.14～1.31)における同施設の梁部分における1日当たりの日射束密度の平均値は、 $5.9 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ 、この時の外部の値は $9.6 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ であった。

次いで、昼間に必要とする熱量 $Q_d \text{ (Wh} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$

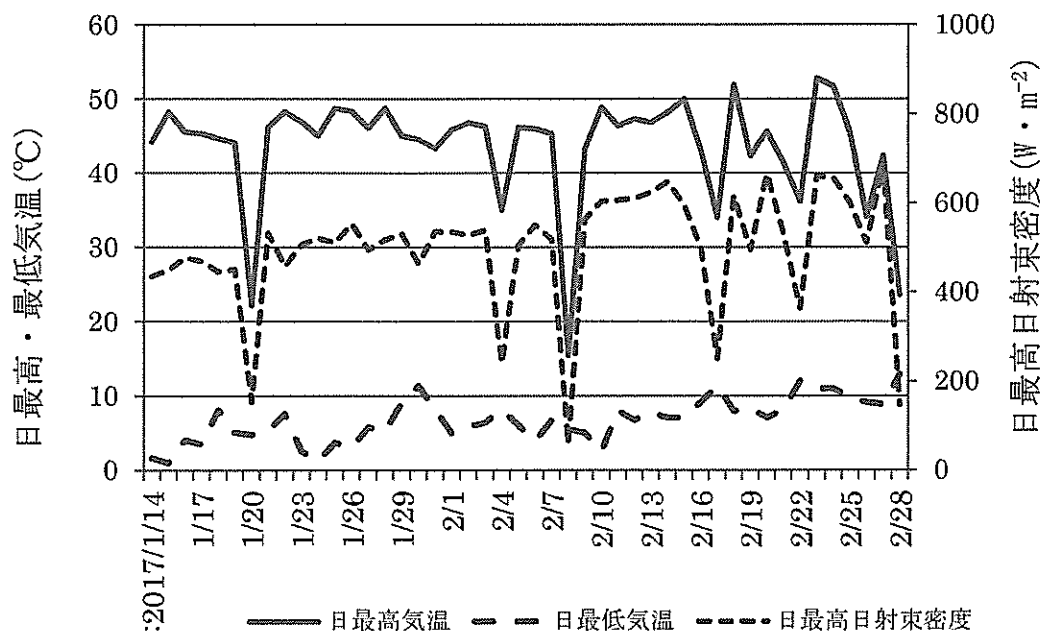


図1 室内上部「梁」周辺日最高気温と室内の日最高日射束密度 (イワタニ アグリグリーンハウス、2017.1.14～2.28)

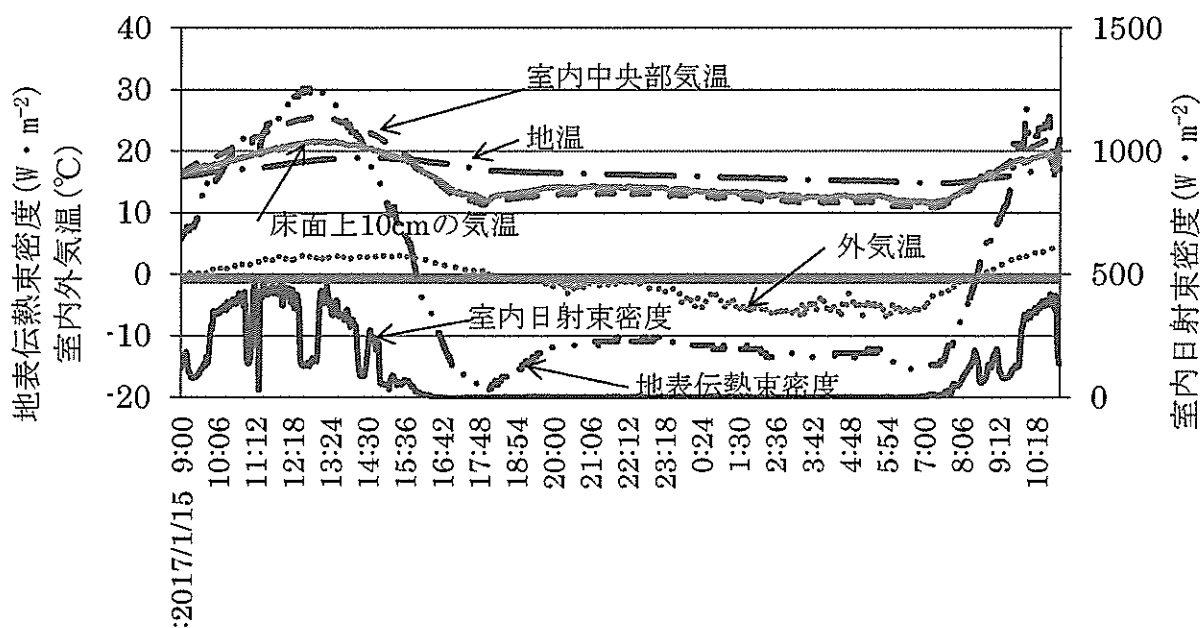


図2 室内日射束密度、室内外気温と地表伝熱束密度の日変化
測定日：2017.1.15～16 (図1の一部)、イワタニ アグリグリーンハウス

$$= a * A_g * D_d + A_s * q_{sd} * h \quad (1)' \text{式}$$

放熱係数は夜間と同じ値とする。

D_d ：昼間の暖房デグリアワー ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} \cdot \text{day}^{-1}$)

$D_d = (t_{cd} - t_{outd}) * h_d$ とした。

t_{cd} ：昼間の設定気温 ($^{\circ}\text{C}$)

t_{outd} ：昼間の平均外気温 ($^{\circ}\text{C}$)

h_d ：昼間の時間 ($\text{h} \cdot \text{day}^{-1}$)

q_{sd} ：昼間の平均地表伝熱束密度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

t_{cd} は 20°C とし、 t_{outd} と q_{sd} は2017年1月15日の実測値の2.4および20.8を使用する。 h_d は6とし、熱節減比は採光を重視する必要性から保温カーテンは開放状態とした。

$$= 6.6 * 3,564 * 17.6 * 6 + 20.8 * 2430 * 6$$

$$= 2,787 \text{ (kWh} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$$

さらに床面積当たりになると、 $4.1 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ 相当となった。

したがって、夜間分の $4.6 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ を加えると1日当たりの暖房熱量の概略値は、 $8.7 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ となる。

また、全天日射量の夜間の暖房熱源としての有効性については、夜間の冷え込みが厳しい日の全天日射量が多いことが、全天日射量を有効に利用する上で必要となる。この点は全天日射量が比較

的少ない地域において重要である。図3に全天日射量のデータが公表されている4地点における全天日射量と日最低気温のグラフを示した。「館野」(茨城県)における1月の1日当たりの全天日射量の月平均値(平年値)は、 $9.6 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ ほどであり、日最低気温が低い時に全天日射量が多い傾向がみられ、余剰太陽熱を有効に利用できると考えられる。「仙台」の1月の日最低気温は「館野」より高いが、1日当たりの全天日射量は $8.1 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ と「館野」より少なく、しかも日最低気温との関係も館野ほど明確でないことから、HPによる熱量供給がより必要になると思われる。「室蘭」(北海道)では、日最低気温が低い上に全天日射量の月平均値(平年値)が $5.7 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ で、「名古屋」や「館野」の60%程度であり、かなり厳しい状況であるが、全天日射量が $8.0 \text{ (MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}\text{)}$ を上回る日が1月において10日ほどあり、その日数程度の余剰太陽熱の利用が可能と思われる。

今回検討中の集熱場所は、従来使用していた場所に比べ比較的安定した熱源として利用できることがわかった。その利用については余剰太陽熱の大きさによって次のような利用が考えられる。

表1 各地の日平均全天日射量と日最低気温（アメダス観測値、1月、平年値）

	日平均全天日射量（外部） (MJ・m ² ・day ⁻¹)	日平均日射束密度の積算値（内部） (MJ・m ² ・day ⁻¹)	日最低外気温 (°C)
名古屋	9.1	-	0.8
館野（茨城）	9.6	-	-3.1
仙台	8.1	-	-1.7
室蘭	5.6	-	-4.2
参考 柏（千葉）	9.6	5.9	-2.6

注 柏の日平均全天日射量（外部）と日最低外気温は2017年1月の平均値であり、室内の日射束密度の日積算値は2017年1月14日～31日の平均値でイワタニ アグリグリーンハウス内での測定値である。

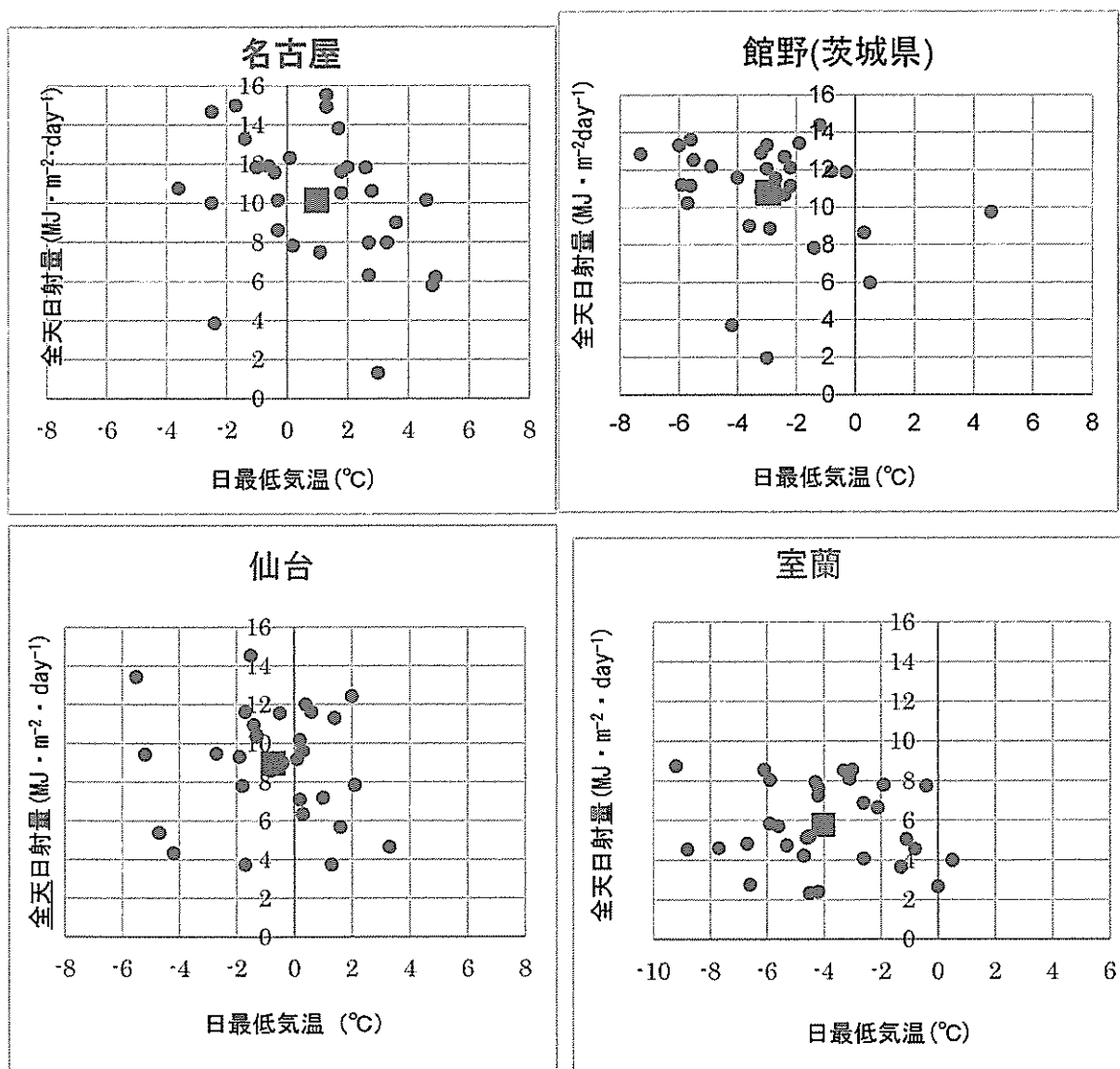


図3 4地点における1日当たりの全天日射量と日最低気温の関係
(2017年1月のアメダス観測データを使って作図、■は平均値を示す)

- a. 設計外気温を高めに設定して、HP の設置台数を減らし、設備費の低減と電気代のうちの基本料金を節減する。また、このことにより HP の負荷率が改善されるほか、暖房期間中すべての暖房熱量のベースとして利用でき、日射条件によっては電気代の従量料金を大幅に節減することが期待される。
- b. 暖房時における気温むらを改善する熱源として利用できる。蓄熱する水槽はハウス内に設置可能であり、熱交換機あるいは水-空気式 HP の利用により、ハウスの適地に熱源を設置できる。これまで HP からの温風の拡散が比較的悪く、気温むらが生じやすい傾向があったがその改善に役立つ。
- c. 外気温がとくに低い時の COP 低下対策ならびにデフロスト対策として活用できる。ハウス内暖房設定温度より低くなった水は、HP 室内機のデフロスト用の熱源として利用できる。また、空気熱源式 HP と水-空気式 HP を組み合わせることで使用することにより、デフロスト中の COP の低下対策にも利用できる。

残された課題としては、次の 3 点があり、引き続き報告予定である。

- ①集熱装置の設置に関し、影を増やさない集熱場所（梁の上）の面積と集熱方法
- ②最大暖房負荷あるいはその半量の熱量を放熱する放熱装置の実用性
- ③施設上部における顕熱割合の把握

3. 地表伝熱量の季節変化

室内における地表伝熱量（地中伝熱量とも呼ばれている）は、室内の空気と床面温度との温度差によって生じる熱流を意味し、室温が高い時は床面への熱の流れ（プラス方向の流れと称している）が生じ、逆に床面温度が高い時は室内への流れ（マイナス方向）が生じる。一般的には、昼間はプラス方向の流れが生じ、夜間はマイナス方向の流れとなる。マイナス方向の熱流は、冬期においては暖房の補助熱源となり、夏期では夜間冷房を行う

場合の冷房負荷を増加させる。

太陽光型植物工場などにおけるヒートポンプ（以下 HP と略す）の容量設計は、暖房の場合、最大暖房負荷を算出して行われているが、保温カーテンなどを含む保温性能が最近改善されていることを考慮すると、暖房機器が過剰設備にならないようにするために、地表伝熱量を見込んだ設計を行うことの必要性が高まっていると考える。また、夏期の夜間冷房を行う際には、冷房負荷を小さくするために地表伝熱量を極力抑制するための方策が必要となる。この対策として、地表伝熱量の冬期と夏期における実態把握とともに床面シートによる変化などのデータ収集を行い、本誌 2015 年 11 号で紹介した⁸⁾。

ここでは、1 月および 2 月の厳寒期における温度状況の測定結果と併せて、冬期と夏期における地表伝熱量の測定を繰り返し行った結果について紹介する。

イワタニ アグリグリーン(株)が栽培管理されている太陽光利用型植物工場内において、これまでの測定と同様の方法で継続実施した⁸⁾。なお、地表伝熱束密度の測定に際し、センサーを地表面下 1cm の浅いところに埋設し、測定感度と応答性がよくなるようにした。実際に測定点における土壌状態は、粘土質土壌で粒子が比較的細かく、さらに床面シートを土壌面に密着させて張ることにより比較的安定した測定ができ、時間遅れもとくに見られなかった。

2 年間にわたり冬期と夏期における地表伝熱束密度の測定を実施した結果、夜間における上向きの地表伝熱束密度について、次のことがわかった。

冬期夜間における上向きの平均地表伝熱束密度は、地表面下 1cm の地温が地表面より 10 cm のところの気温より約 0.8℃低い時にほぼゼロとなり、地表近くの気温が低下するか地温が上昇して温度差が生じると、温度差 1℃あたり約 3.1W・m² の地表伝熱束密度が生じ

ることがわかった。なお、この地表伝熱束密度は、地表面の被覆状態と土壌の種類および水分状態によって変化する。

以上の関係は夏期においても同様の比例関係がみられた。夏期における地表伝熱束密度は、冬期より大きくなるので、夜間冷房を行う場合は昼間の下向きの地表面束密度をできるだけ抑制すること、夜間冷房を行うまでに地温を極力低下させる工夫が必要となる。また、夜間冷房を行う際の設定気温を地温より低くすると地表伝熱束密度が増加し冷房負荷を増大させるので、地温なみの気温に設定することが消費電力量を節減するために大切である。

説明：2014年5月から6月、2015年1月と2017年1月と6月の測定結果をそれぞれ6日ずつ、計24日分の測定結果を合わせて図4に示した。兩年の結果はほぼ同様の関係とみられ、 $y = 3.05x - 2.66$ ($R^2 = 0.77$) の回帰式で表示された。すなわち、冬期および夏期において、地表面近くの気温と床面温度の差1℃当たり約 $3W \cdot m^{-2}$ の地表伝熱束密

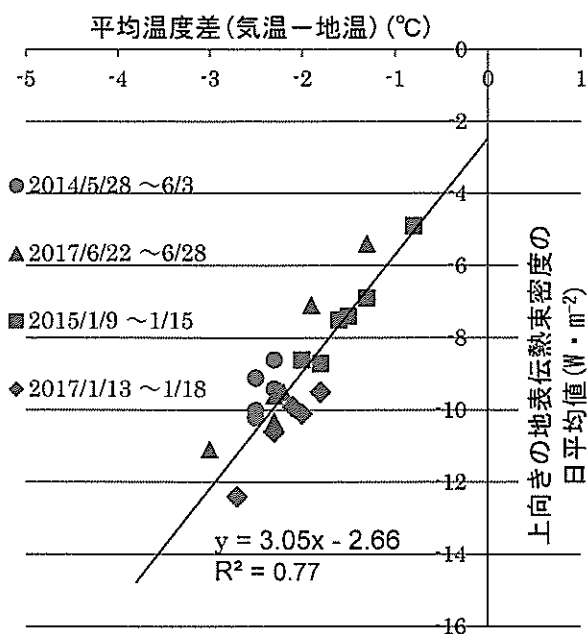


図4 地表伝熱束密度の日平均値と気温と地温の差の平均値との関係
(イワタニ アグリグリーンハウス)

度が生じ、地表近くの気温が地温より約0.8℃高い状態で、地表面における熱流がゼロとなる。夏期に行う夜間冷房においては、冷房設定温度は、地表面温度より約0.8℃高い気温を下限値として冷房することが、冷房負荷を小さく抑制するために必要である。また、床面被覆材として反射性および断熱性が高い被覆資材を使用することの効果については既報に示したとおりである⁸⁾。

〔謝辞〕

農業用ヒートポンプ分科会において、2013年から4年間にわたり参加され熱心に討論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イワタニ アグリグリーン(株)に深謝する。

<引用文献>

- 1) 日本施設園芸協会編 (2015)：施設園芸・植物工場ハンドブック，農山漁村文化協会，127.
- 2) 関山哲雄・古在豊樹 (2017)：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 初期投資節減のためのヒートポンプ台数の削減，農業電化，70-4，6-12.
- 3) 関山哲雄・古在豊樹 (2017)：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，農業電化，70-5，8-12.
- 4) 岡野利明・山本雄二郎・青木清 (1980)：水蓄熱式太陽熱暖房温室に関する研究，電中研報告，479012，21p.
- 5) 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調の気温より高い原因について，農業電化，69-4，16-20.
- 6) 三原義秋編 (1980)：温室設計の基礎と実際，養賢堂，182-186.
- 7) 日本施設園芸協会編 (1987)：新訂施設園芸ハンドブック，日本農民新聞社，178-184.
- 8) 関山哲雄・玉城鉄 (2015)：園芸施設における地表伝熱の特性と床面被覆材の評価法，農業電化，70-5，6-10.