夏期の栽培ハウスにおける熱環境性状と冷房エネルギー消費量に関する検討

THERMAL CONDITION AND COOLING ENERGY CONSUMPTION OF CULTIVATION GREENHOUSE IN SUMMER

室 恵子 — * 1 三田村輝章 — * 2
安西敏浩 — * 3 中井真三 — * 4

Keiko MURO — * 1 Teruaki MITAMURA — * 2
Toshihiro ANZAI — * 3 Shinzo NAKAI — * 4

キーワード：
栽培用ハウス、熱環境、冷房用エネルギー消費量

Keywords：
Cultivation greenhouse, Thermal condition, Cooling energy consumption

The greenhouse cultivation is often used by the agriculture. It is possible to grow vegetables in the greenhouse in summer if the greenhouse is airconditioned. In addition, the amount of agrichemicals decreases, because the insects do not enter the air-conditioned closed greenhouse. However, there are few air-conditioned greenhouses. It is uncertain whether the air-conditioned thermal environment is appropriate to cultivation. Authors measured thermal environment of the greenhouse and electric consumption of air-conditioning in summer, and showed the result of the cooling load and electric consumption calculated with TRNSYS.

1. はじめに

農作物の生産では、被覆材にガラスやプラスチック系フィルムを用いた栽培ハウスが多用されている。しかし、夏期はハウス内が高温となるため、休耕とされることが多い。このような栽培施設に対して安価に冷房が導入できれば、①夏期においても生産施設としての使用が可能となり、②作物の出荷時期調整にも利用できる。また、③栽培ハウスを閉空間にできるため害虫等の侵入防止に効果的であり、その結果、農薬使用量が削減され、作物の商品価値を高めることができるといった利点がある。

栽培施設用の冷房としては、細霧冷房、パッド&ファン冷房と呼ばれる水の蒸発冷却を利用したものが一般的である。しかし、近年のヒートポンプの性能向上とともに、ヒートポンプであれば暖房時にも使用できるといった利点があるため、石油価格高騰への対応策としてその導入が検討されるようになってきている。これまでヒートポンプによる冷房は、屋外の気象変動の影響を極力排除した、いわゆる植物工場や、高度な環境制御が求められる高級花卉等の栽培に使用される程度であった。そのため、従来型の栽培施設を対象とした場合、設備等の仕様決定に必要なデータがほとんど整備されていないのが現状である。

本研究は、ヒートポンプによる冷房を導入した大規模生産施設計画のための事前調査として、設備仕様等の決定に必要な基礎資料の収集を目的とするものである。本報では、栽培ハウスモデルを用い、夏期におけるハウス内熱環境性状、栽培環境としての適性、冷房電力消費量等について、実測および数値計算により検討した結果を示す^{注1)}。

2. 実験方法

栽培ハウスモデルは2005年、栃木県足利市（本学敷地内）に建設された。2005年夏より実験を開始し、現在も継続中である。

2.1 栽培ハウスモデルの概要

栽培ハウスモデルの概要を図1、表1に示す。栽培ハウスの床面積は36m²、栽培面積は約10m²である。計画中の施設の仕様に合わ

図1 実験用栽培ハウスの概要と主な測定点

*1 足利工業大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)
(〒346-8558 足利市大前町268-1)

*2 足利工業大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

*3 足利工業大学総合研究センター 客員研究員・工博

*4 足利工業大学総合研究センター 客員研究員

*1 Assoc. Prof., Dept. of Archi., Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.

*2 Lect., Dept. of Archi., Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.

*3 Guest Researcher, Collaborative RC., Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.

*4 Guest Researcher, Collaborative RC., Ashikaga Institute of Technology

せ、高さ60cmの架台上にプランターを置き、ホウレン草等の葉物野菜を栽培した。

ハウス内の冷房には、冷房能力2.8kWの家庭用エアコン(以下、AC)を2台用いた。栽培土壌の温度が高くなると作物の生育に障害となる^{注2)}ため、AC空気は簡易的な送風管によりプランター架台下に吹出すようにした。架台は網目状で、架台下に吹出した冷気はその隙間からも拡散するようになっている。冷房による除去熱量は、ACの吸込み・吹出し空気の温湿度を測定し、これと事前に計測したAC吹出し風量192m³/Hourから概算した^{注3)}。また、換気扇はタイマー運転されている。換気扇の排気側、給気側にダンパーがあり、換気扇の発停に合わせて開閉する。換気風量は、排気側で16点の風速を計測し、その値をもとに概算した。実測値による換気風量は約5300m³/Hourであった。

データはデータロガーを用い1分間隔に採取した。図1に示す計測点の他、水平面全天日射量、透過日射量、外気温・湿度、AC電力消費量、透過照度等について測定した。

2.2 実験モード

実験モードを表2に示す。換気、冷房、散水、野菜栽培、壁面への断熱材設置の有無により7モードを設定した。30分毎に2分間の換気^{注4)}、および、8:00-17:00(以下、昼間)=30℃、17:00-翌8:00(以下、夜間)=25℃の冷房設定温度は、従来の栽培方法をもとに生産者により定められた。また、散水は当初、自動で規定量を給水していたが、プランター土壌の水捌け等の問題により、目視で判断し適量を散水するようにした。冷房断熱モード^{注5)}では、壁面4面(出入口を含む、H=2.5m)の屋外側にフォームポリスチレンボード50mmを貼り付けた。

3. 実測による栽培ハウス内の熱環境性状と冷房負荷

3.1 気温・地温の状況

図2は、自然モード、2分換気モード、連続換気モード、冷房栽培モード、冷房断熱モードの晴天日におけるハウス内気温および

プランター地温、冷房電力消費量等の時刻変動状況である。各モード測定日の日射量、外気温には若干の差が見られるものの、いずれも典型的な夏期気象条件と見なすことができる。

(1)栽培ハウス内の気温

自然モードと2分換気モードで各点の温度は同程度となっていた。遮光ネット上の気温は最高で75℃を超え、昼間時間帯の平均

表1 実験用栽培ハウス・機器の概要

温室	ポリオレフィンフィルム 0.15mm、軽量鋼構造 断熱モード:50mmフォームポリスチレンボード・壁4面	
プランタ	12台×4列=48台(約10m ²) プランタサイズ:0.63m(W)×0.34m(D)×0.23m(H)	
換気扇	消費電力	200 W
	風量	第3種:北側壁面より排気、南側壁面に給気口(運動してダンパーが開閉) 7200 m ³ /Hour [63回/Hour] (実測 5300 m ³ /Hour [46回/Hour])
冷房	冷房能力 消費電力 COP	2.8 kW(0.3-3.5)×2台 580 W(120-1250) 4.83 (夏期実測期間平均=3.2)

表2 実験モードと実測期間

実験モード	換気	冷房	散水	栽培	断熱	実測期間
自然	×	×	×	×	×	2005/8/27-8/31, 9/17-9/19
2分換気	2分/30分	×	×	×	×	2005/8/11-8/26, 9/2-9/4
連続換気	連続	×	×	×	×	2006/7/3-7/9
冷房基本	2分/30分	8:00-17:00 30℃設定 17:00-8:00 25℃設定	×	×	×	2005/9/9-9/13 2006/7/10-7/17
冷房・散水			○	× 発芽前	×	2006/7/18-8/6
冷房・栽培			○	○	×	2005/9/21-11/13 2006/8/13-8/27
冷房・断熱			○	○	壁面 50mm	2006/8/29-10/1

(a) 自然モード

(b) 2分換気モード

(c) 連続換気モード

(d) 冷房栽培モード

(e) 冷房断熱モード

図2 各実験モードの気温と地温(晴天日)

値でも65℃を超えていた。一方、H=90, 120cmの気温にはほとんど差がなく、H=30, 60cmの気温はそれより10K程度低かったが、40℃を越えるような状態であった。本実験のような栽培方法では、H=30-120cm付近の気温が生育に関与する。これらの平均値を求めたところ、自然モードの場合、日平均=33.4℃、昼間平均=43.0℃、夜間平均=26.6℃、2分換気モードの場合、日平均=34.5℃、昼間平均=42.6℃、夜間平均=28.6℃となっていた。30分間隔に2分間の換気(88m³/min)ではハウス内の熱環境緩和にほとんど効果がなく、これらのモードの熱環境は栽培に不適当な状態であった。

冷房栽培モード、冷房断熱モードにおいて、遮光ネット上の気温は自然モード等と同程度まで上昇していたが、H=30-120cmの気温は、昼間平均=33.9℃(栽培)/32.9℃(断熱)、夜間平均=26.1℃(栽培)/23.6℃(断熱)で、ある程度許容できるレベルに下がっていた。ただし、設定の冷房温度が達成されていたのはプランター架台下(H=30cm)だけであり、H=120cmの気温は10:00-14:00の時間帯に40℃を越えていた。なお、遮光ネット上の気温が周期的に大きく低下しているが、これは換気扇の作動によるものであり、2分換気モードでも同様の変動が生じていた。

一方、連続換気モードは他のモードと大きく異なり、高さ位置における気温の差が小さかった。H=30-120cmの日平均気温=28.8℃、昼間平均=34.0℃、夜間平均=25.1℃で、平均温度は冷房栽培、冷房断熱モードと大きな差はない。ただし、H=120cmの最高気温は38.9℃で冷房モードより5K以上低くなっていた。

(2) プランター地温

地温の温度上昇は、ハウス内東側プランターよりも西側プランターに多少時間遅れが見られたが、その差は僅かであった^{注6)}。一方、気温の変動に対して地温には2時間前後の遅れが生じていた。

葉物野菜の栽培では、地温が30℃を超える時間が長く続くと生育に支障が出ると言われている。プランター地温の日平均値は、自然=33.9℃、2分換気=35.1℃、連続換気=29.1℃、冷房栽培=29.8℃、冷房断熱=27.8℃であった。連続換気、冷房栽培、冷房断熱モードの場合、平均気温は昼間時間帯においても30℃以下に抑えられ、最高温度も35℃以下であることから、栽培環境として許容できる程度に抑えられていたと考えられる。一方、自然、2分換気モードでは、昼間時間帯の大半において地温が40℃を越えており、作物栽培には適さない状態となっていた。

(3) 相当外気温度と気温・地温との関係

自然および2分換気モードのハウス内気温およびプランター地温について重回帰分析を行ったところ、これらは日射量および外気温により説明できることが確認された。図3は、各モード実測期間におけるH=30-120cmの平均気温、および全プランターの平均地温と相当外気温度(SAT)^{注7)}との関係である。なお、値はいずれも1時間の平均値で示した。

ハウス内気温、プランター地温はSATの対数式により概ね近似が可能であった。ただし、連続換気モードの場合、他モードに比べてその相関が低い、これは換気量が大きく外気温の影響が大きかったことによると考えられる。

また時刻変動にも見られたように、ハウス内気温、プランター地温は自然モードと2分換気モード、冷房栽培モードと冷房断熱モードでそれぞれ同様の傾向を示した。冷房栽培、冷房断熱モード

の場合、ハウス内気温が30℃を越えるのはSAT=40℃程度で、両モードとも同程度であった。一方、地温が30℃を越えるのは、栽培モード; SAT=38℃、断熱モード; SAT=48℃で、冷房断熱モードの方が地温は低く抑えられていた。

3.2 冷房運転状況

(1) 時刻変動

図2の冷房栽培モード、冷房断熱モードにおけるAC運転状況より、晴天日の場合、10:00-15:00頃の時間帯は冷房が連続運転され、その前後の時間帯では発停が繰り返されていた。両モードで夜間の冷房運転状況が異なっているが、これは外気温の差によるものと考えられる。なお、冷房断熱モードでは昼間時間帯に電力

図3 相当外気温度と室温・地温

図4 冷房電力消費量と除去熱量との関係

図6 冷房モードにおけるオーバーヒート量

図5 相当外気温度と冷房除去熱量との関係

消費量の半減が見られるが、これはACの保護機能により、長時間「強」運転が連続するような状態になると、自動的に出力が抑制されるためである^{注8)}。

(2) 相当外気温度と冷房電力消費量・除去熱量との関係

図4は、冷房による電力消費量とその除去熱量との関係である。昼間、夜間の冷房設定温度による差はほとんどなく、電力消費量と除去熱量には線形関係が見られた。またこの関係より、本実験における冷房電力の消費効率 η は2.85程度であったと考えられる。

冷房電力消費量、冷房除去熱量について重回帰分析を行ったところ、気温、地温と同様に日射量、外気温が有意であった。図5はSATと冷房除去熱量との関係を示したものである。SATの上昇に伴い除去熱量は増加し、SATの上昇1Kに対する除去熱量の増加は、冷房栽培 $\eta=0.14\text{kW}$ 、冷房断熱 $\eta=0.11\text{kW}$ で、冷房断熱モードは冷房栽培モードの約8割となっていた。

一方、図6は冷房栽培モード、冷房断熱モードの実測期間において、昼間時間帯に気温が 30°C を越えた時間数の割合、昼夜の時間帯に地温が 30°C を越えた時間数の割合、および、気温、地温の 30°C からの温度差の日積算値を比較したものである。期間中のSATの平均値は、冷房栽培 $=35.9^{\circ}\text{C}$ 、冷房断熱 $=32.7^{\circ}\text{C}$ と断熱モードの方が約3K低いものの、昼間時間帯にオーバーヒートする時間割合、オーバーヒート量は冷房栽培モードよりも多くなっていた。

実測結果から、栽培ハウス壁面に断熱材を設置することにより冷房電力消費量の削減が期待される。しかし、断熱モードの実験時にはACが出力抑制運転されており、またハウス内気温のオーバーヒート時間・量が断熱材を設置していない冷房栽培モードより多いことから、一概には結論づけられない。これに関しては数値計算により検討する。なお、地温については冷房栽培モードよりも断熱モードの方がオーバーヒートが少なく、断熱材によって日射が遮蔽されたことの効果と推測される。

5. 栽培ハウスにおける冷房負荷量の算定

5.1 計算条件

多数室熱計算プログラムTRNSYS ver. 16を用い、本実験に使用した栽培ハウスの夏期における冷房負荷量を算出した。表3に計算条件を示す。なお、冷房負荷量をAC電力消費量に換算する際のCOPは、実測結果をもとに外気温で補正して用いた。また、ハウス内への透過日射量については、軟質フィルムおよび遮光ネットの透過率をもとに計算した。

5.2 計算結果

(1) 実測値と計算値の比較

図7に冷房栽培モード(壁面断熱材無し)、冷房断熱モード(壁面断熱材有り)における実測値と計算値を示す。気温の計算値は、 $H=30\text{cm}$ または 60cm の実測値に近い値を示し、 $H=90, 120\text{cm}$ の気温とは大きな差が生じていた。これは、AC冷気がプランター架台下に吹出されていたこと、ACのサーモスタットセンサーが 60cm 程度の高さに設置されていたことによると考えられる。

冷房電力消費量について、冷房栽培モードでは比較的良好な対応が見られた。冷房栽培モードにおける実測値と計算値の日積算値の差(絶対値)は9%であった。一方、断熱モードの場合、その差は23%と大きかった。これは前述のとおり、実測では熱負荷の多い昼間時間帯にACの出力抑制運転が行なわれ、それに合わせて電力

表3 計算条件

建物モデル	ポリオレフィン(P0)フィルム; 熱物性値はポリプロピレンのものを使用 日射透過率 $=0.92$ (P0フィルム) プランター土壌分; 容積 $=4.5\text{m(H)} \times 3.0\text{m(W)} \times 0.15\text{m(D)}$ 土壁と仮定 冷房断熱モード: フォームポリスチレン 50mm
冷房設定温度	8:00-17:00; 30°C 17:00-8:00; 25°C
最大冷房能力	$2.8\text{kW} \times 2\text{台} = 5.6\text{kW}$ COPは実測値を外気温換算して使用
換気量	機械換気: 1時間あたり4分. $5300\text{m}^3/\text{Hour}$ 自然換気量は考慮しない。
気象データ	実測値 拡張アメダス気象データ(栃木県・佐野)

図7 実測値と計算値の比較(ハウス内気温・電力消費量)

図8 栽培ハウスにおける夏の冷房電力消費量(標準気象データ; 佐野)

消費量も減ずることが原因と考えられる。断熱モードの場合、実測値と計算値の差は大きい、熱負荷量に対する冷房電力消費量としては、計算値の方が実態に則しているものと推測される。

(2) 夏期における冷房電力消費量

本栽培ハウスモデルの夏期6-10月における冷房電力消費量を算出した。負荷計算には、栽培ハウス建設地に直近の栃木県・佐野の拡張アメダス気象データ⁷⁾を用いた。

冷房電力消費量は8月に最も多くなり、断熱材無しモード=425 kWh/月、断熱材有りモード=371 kWh/月で、有りモードの方が約13%少なかった。また、6-10月の総電力量としては、断熱材無しモード=1059 kWh/月、断熱材有りモード=900 kWh/月で、約15%の差となった。栽培ハウスにおいて冷房を行なう場合、冷房負荷量の削減には壁面の断熱・遮光が有効であると考えられる。

6. おわりに

栽培ハウスモデルを建設し、夏期のハウス内熱性状および冷房消費電力量について実測した。また数値計算により、本モデルにおける夏期冷房の所要電力量を算出した。以下にその結果をまとめる。

- 1) 自然モード、2分換気モードは、気温、プランター地温とも栽培に不適当な高温となっていた。
- 2) 連続換気モードでは、ハウス内気温の上下温度差が少なく、プランター地温は冷房使用時と同程度であった。
- 3) 冷房栽培モード、冷房断熱モードの場合、H=30-60cmの気温は冷房設定温度付近の温度に保たれていた。しかし、それより高い位置の気温は、晴天日の場合、40℃以上に上昇していた。これは、ACサーモスタットセンサーの設置位置の問題と考えられる。
- 5) 連続換気モードを除き、ハウス内気温、プランター地温、冷房電力量については相当外気温、すなわち日射量、外気温により推計可能と考えられる。
- 6) 数値計算により本栽培ハウスモデルにおける夏期の冷房電力消費量を推計したところ、6-10月の5ヶ月間で1059 kWhの電力量が必要であった。一方、栽培ハウスの壁面に断熱材を設置したところ、冷房電力消費量は約15%削減された。

本実験の結果より、ハウス内熱環境性状、および、その熱環境形成に要する電力消費量の観点から、夏期の栽培においては連続的な大量換気が効果的と考えられる。ただし、冷房の導入には作物の生育調整やハウスを閉空間にできるといった商品価値上の利点もあるため、総合的な判断が必要である。

一方、栽培ハウスの冷房電力消費量は壁面に断熱材を設置することで削減できるという結果が得られたが、これについては冬期の暖房負荷に及ぼす影響、栽培に適した光環境が確保できるか、また不足の場合、照明にはどの程度の電力量を要するかといった点も合わせて検討する必要がある。

今後は、年間の暖冷房負荷とともに光環境としての適性等も考慮し、栽培施設へのヒートポンプ導入の可能性を検討していく。

【謝辞】

本研究の一部は、平成17年度群馬県地域研究開発促進拠点支援(RSP)事業「栽培ハウスの最適空調方式の探索と実験的研究」および(株)アグリオザワバイオニクス、(株)アグリットによる「無農薬で有機栽培ができる野菜栽培プラントの検討」の一環として実施された。また、本実験を行なうにあたり、矢畑公伸氏、吉澤正典氏、伊倉竜一氏(当時足利工大卒研)には多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表する。

【注】

- 注1) 本報の一部は、「夏期における栽培ハウスの熱環境性状と冷房用エネルギー消費量、太陽/風力エネルギー講演論文集、2006.10、室、三田村、安西、中西」において発表されている。
- 注2) 作物の生育には、栽培期間の気温の積算値が大きく関与する。例えば、昼間が高温となった場合、夜間を低温に抑えることである程度生長を制御することができる。一方、地温については、30℃を越えるような時間が長く続くと、生育が困難、または作物の商品価値が損なわれる。そのため、架台に載せたプランターで栽培する場合には、プランター地温を上昇させないことが重要な課題となる。
- 注3) ACの風量については「強」設定に固定した。また、AC消費電力量は2台とも計測したが、AC吹出し・吸込みの温湿度については1台分しか計測できなかった。そこで、1分間隔の計測値からAC消費電力量と除去熱量に関する回帰式を求め、これをもとに未計測ACの除去熱量を推計した。分析に用いた除去熱量はこれらを合算した値である。
- 注4) 30分毎に2分間の換気は、基本的には栽培ハウス内の炭酸ガス濃度調整のために行われるものである。
- 注5) 壁面に設置した断熱材には遮光効果もある。本実験では当初、冬期における壁面からの熱損失の抑制を主たる目的として断熱材を設置したため「冷房断熱モード」と呼ぶ。
- 注6) 予備調査として、2005年夏期に南北50m×東西54mのガラス温室の実測を行なった。その際、東西の地温上昇には時間差が見られたことから、大規模施設ではその差異にも考慮が必要と考えられる。
- 注7) 相当外気温は、日射量と外気温を単純化して表わすものとして用いた。そのため、相当外気温の算出では、実効放射量を考慮せず、熱伝達率についても一定値(23[W/m²K])とした。
- 注8) 今回の実験に用いた家庭用エアコンには、機器の保護のため、「強」運転が連続した場合、自動的に出力を絞るような制御機能が備わっている。冷房栽培モードの実験期間中は、その制御を無効にするよう調整していたが、機器の故障等により、それ以降のモードでは、自動的に出力が抑制される制御とした。冷房栽培モード、冷房断熱モードとも、晴天日昼間は熱負荷量として「強」の連続運転を要するような状況と推測される。実測では、両モードにおける熱環境、電力消費量等を直接的には比較できないため、これについては数値計算により検討する。

【参考文献】

- 1) 関山哲雄; 施設園芸の環境調整と省エネ技術, 農林統計協会, 2005
- 2) 日本農業気象学会施設園芸研究部会編; 施設園芸読本, <http://phdsamj.ac.affrc.go.jp/>
- 3) フレッシュフードシステム2006秋号「人工環境栽培技術の現状と課題」, (株)流通情報センター
- 4) 高辻正基; 植物工場システム, シーエムシー, 2001
- 5) 赤林他; 家庭用エアコンCOP簡易測定法の開発, 建築学会技術報告集, 第22号, pp. 315-318, 2005.12
- 6) 日本熱物性学会編; 熱物性ハンドブック, 養賢堂, 1990
- 7) 日本建築学会編; 拡張アメダス気象データ, 2000

[2007年4月20日原稿受理 2007年7月26日採用決定]