太陽光型植物工場における連続細霧発生による 気温・飽差制御システムの開発

渡 邊 孝 一*・浅 野 洋 介*・栗 本 育 三 郎*
糠 谷 綱 希**・狩 野 敦***・丸 尾 達****

Development of Temperature and Vapor Pressure Deficit Control System Using Variable Rate Fogging in Plant Factory with Solar Light

Kouichi WATANABE*, Yosuke ASANO*, Ikusaburo KURIMOTO*,
Tsunaki NUKAYA**, Atsushi KANO*** and Toru MARUO****

We report the construction of temperature and VPD (Vapor Pressure Deficit) control system. In the plant factory with solar light, the control method for temperature and VPD using fogging system was not confirmed in the previous research. We propose the control method for temperature and VPD using variable rate fogging system by VPD feedback control to improve the growing environment of the plant. We subjected evaluation and review of the system that adjusts the fogging rate based on the VPD, and performs variable fogging. As a result, it increased the tomato fruit yield about from 10% to 20% more than the control area by proposed system in summer and winter.

Key Words: plant factory, variable rate fogging, vapor pressure deficit control

1. 緒 言

異常気象や自然災害の深刻化、高年齢化が進む現代社会において、食の安心安全や農作物の安定した生産が求められている。その解決策として植物工場が挙げられる。植物工場は、温湿度や CO₂ 濃度、光量子束密度などを制御可能な閉鎖環境下で行なう人工光型¹⁾と、太陽光を利用し、CO₂ 施用、窓開閉、冷暖房および加湿・除湿を半閉鎖環境下で行なう太陽光型²⁾がある。日本の太陽光型植物工場における課題の一つに、夏季の高温による生長阻害および収量の低下が挙げられる。施設の冷暖房に利用されるヒートポンプは、夏季昼間の高温を抑制するにはコストが掛かり、除湿効果が働き施設内

が過度に乾燥してしまうため有効ではない。有効な手段として、細霧冷房システムが挙げられる。細霧冷房システムでは日射過熱がある日中において、粒子直径 10~30 μm の微細な霧を発生させ、蒸発する際の気化熱を利用して冷却を行なう³⁾。加湿をしながら冷却するため、空間の気温と湿度を調整可能である。加湿ができることから、夏季高温を抑制する目的以外に乾燥期の調湿などにも利用できる。

従来の細霧冷房システムにおいては一般的にオンオフ制御が用いられている^{4),5)}。オンオフ制御では、空間の水分量を考慮せず噴霧の時間幅を経験的に調整するため噴霧量の過不足が生じてしまう。噴霧量が過剰な場合には植物体が濡れてしまい、付着した水によりカビや病気が発生する問題がある。また、相対湿度によって噴霧量を調節する研究も試みられている⁶⁾。しかし、植物の光合成に必要な蒸散効率は空間の水蒸気飽差 (Vapor Pressure Deficit: VPD) の影響を受ける^{7),8)}。同じ相対湿度でも温度が変わると空間の VPD が変化し、植物にストレスを与えてしまうため有効ではない。そこでわれわれは植物の蒸散効率を最大化する環境を実現するため、VPD を一定に保つように細霧の噴霧量を連続的に調整可能なシステムの提案を行なう。従来研究において、細霧の噴霧量調節による VPD 制御のシミュレーションは行なわれている⁹⁾。しかし、日本の夏季高温下の栽培環境で細霧の連続噴霧制御を行ない、有効性と収量への寄与を報告した研究事例はほかにない。

本研究では、計測データに基づいて霧の噴霧速度を連続的

* 木更津工業高等専門学校 木更津市清見台東 2-11-1

** (株) 大仙 豊橋市下地町字柳目 8

*** (株) ダブルエム 静岡市清水区相生町 6-17-606

**** 千葉大学大学院園芸学研究科 松戸市松戸 648

* National Institute of Technology, Kisarazu College, 2-11-1 Kiyomidai-higashi, Kisarazu

** DAISEN CO., LTD., 8 Yaname, Shimoji-cho, Toyohashi

*** DOUBLE M INC., 6-17-606 Aioi-cho, Shimizu-ku, Shizuoka

**** Graduate School of Horticulture, Chiba University, 648 Matsudo, Matsudo

(Received April 3, 2015)

(Revised December 13, 2015)

に調節し、施設内の VPD を安定化する気温・飽差制御システムを提案する。まず、日射の影響を排除するため同心円 2 重構造の通風筒で計測した温湿度から算出される VPD により霧の噴霧速度を算出する。つぎに、インバータユニットの圧力変更、噴霧ノズル数の調整、ゲイン調整制御により噴霧速度を変化させながら連続噴霧を行なう。細霧による気化熱と窓換気により、気温を下げつつ VPD を安定化させる。本論文では、提案システムによる栽培環境での制御効果と収量への寄与を報告する。

2. 気温・飽差制御システムの設計

2.1 提案システムの要件定義

VPD が大きくなると葉面からの過剰な蒸散が起こり、水分消失を防ぐために気孔が閉じて光合成速度の低下が生じる。この水ストレスを軽減するには、気温が変化しても VPD を一定に保つ制御が必要である。従来の細霧冷房の噴霧制御で一般に用いられるオンオフ制御では噴霧の過不足が生じ、植物の蒸散に適切な空間を作り出すことが難しい。そのため、VPD を制御量とした霧の連続噴霧を実現する必要がある。

VPD に基づく霧の連続噴霧には、1) 噴霧環境下で空間の温湿度を正しく計測し VPD の算出を行なう、2) VPD に基づく霧の噴霧速度のリアルタイム制御を行なう、3) VPD に寄与する環境要因と噴霧制御の制約を明確化する、の 3 点を実施する必要がある。以下に、各要件の詳細を示す。

2.1.1 噴霧環境下での温湿度計測と VPD 算出

VPD は、ある温度における飽和水蒸気圧とその空気の水蒸気圧の差を示すもので、その温度の葉面の潜在的蒸散速度の指標である。VPD は乾球温度と湿球温度もしくは相対湿度より求められるが、相対湿度は計測値が誤差をもちやすいため、計測精度が高く汎用的に用いられる乾湿計を用いる。算出式として、Buck の (1)、(2) 式および Sprung の (3) 式を採用する^{1), 10)}。

$$e_{td}(T_d) = 0.61365e^{\frac{17.502T_d}{240.97+T_d}} \text{ kPa} \quad (1)$$

$$e_{tw}(T_w) = 0.61365e^{\frac{17.502T_w}{240.97+T_w}} \text{ kPa} \quad (2)$$

$$D = e_{td}(T_d) - e_{tw}(T_w) - Ap(T_d - T_w) \text{ kPa} \quad (3)$$

ここで A は乾湿計係数 (0.000662 K^{-1})、 p は大気圧 (101.325 kPa)、 T_d は乾球温度、 T_w は湿球温度、 e_{td} および e_{tw} はそれぞれ乾球温度と湿球温度の飽和水蒸気圧、 D が VPD である。

(1)、(2) 式から導かれる乾球温度と水蒸気圧、相対湿度の関係を Fig. 1 に示す^(注 1)。乾球温度 25°C で相対湿度が 60% の状態における VPD は、相対湿度 100% の状態にあたる飽和水蒸気圧と相対湿度 60% の状態の水蒸気圧の差である 1.27 kPa となる。VPD は相対湿度が一定の環境下で乾球温度が変動すると、それに伴って変化する。

(注 1) 厳密には、比エンタルピーと絶対湿度に関する斜交座標系であり、乾球温度と水蒸気圧に関する直交座標系ではない。

Fig. 1 Simplified psychrometric chart

乾球温度の計測において、湿球温度の計測と同等の通風速度で計測を行なうと霧の付着により正しい計測値より低くなるという指摘がある¹¹⁾。しかし湿球温度と乾球温度を空間を隔てた二つの通風筒にて計測すると、時系列変化に誤差が生じ正しい VPD が算出できなくなる。そのため、空間同一地点でありながら、異なる風速により乾球温度と湿球温度を計測し、細霧の付着や日射の影響を排除できる通風筒を設計製作する必要がある。

2.1.2 VPD に基づく霧の噴霧速度のリアルタイム制御

噴霧速度を制御するにはポンプにインバータを設けて噴霧圧を変更すればよい。しかし、低圧噴霧では細霧の粒子径が大きくなる傾向がある¹²⁾。粒子径の大きい細霧は、蒸発する前に下降して葉濡れを発生させ、カビや病気の原因となる。そこで、低速度噴霧が必要となった場合には圧力を一定値未満にはせず、噴霧するノズルの数を少なくして施設全体としての噴霧量を減らす必要がある。

2.1.3 VPD に寄与する環境要因と噴霧制御制約の明確化

VPD の安定化には VPD の増加と減少を制御する必要がある。細霧冷房システムでは噴霧により VPD の減少のみ制御が可能である。Fig. 1 に、乾球温度が 25°C 、相対湿度が 60% の状態が、加温・冷却および加湿・減湿によってグラフ上をどのように遷移するかを示している。夏季は日射の加温によりグラフの右方向へ遷移する。細霧の発生によって加湿・冷房が行なわれるとグラフの左上への遷移が発生し、そのままでは VPD は減少し 0 となる。VPD を増加させるには、換気に伴う受動的な変化を期待するか、窓閉鎖の状態ヒートポンプによる除湿運転を行なう必要がある。換気による受動的な変化が生じると、夏季の昼間の高温下であれば減湿・冷却となってグラフの左下への遷移が発生する。日射の加温および窓換気の減湿・冷却の遷移に対して VPD を一定に保つように細霧噴霧を行なう必要がある。

本研究では、窓換気による自然換気における VPD の増加に追従する霧の噴霧制御のみを試みる。

2.2 提案システムの設計

細霧発生のためのシステム構成を Fig. 2 に示す¹³⁾。一般的な自然換気型細霧冷房の構成と同じく施設の上に細霧を噴射するノズルが多数設けられた管 (以降、噴霧ラインとす

Fig. 2 Configuration of the proposed fog control system

Fig. 3 Schematic diagram of the proposed psychrometer

る)を複数本設置し、等間隔に配置する。噴霧を行なうポンプは噴霧速度を調整するためのインバータに接続する。

計測サブシステムでは、センサにより計測された値と算出した VPD を RS485 通信により制御サブシステムへ送る。センサは I²C 規格の湿球温度計、乾球温度計および日射計である。

制御サブシステムでは、乾球温度と VPD からインバータユニットの出力周波数と噴霧ラインを開閉する電磁弁を制御する。また、計測データにインバータユニット出力周波数と噴霧流量を付与した情報を計測サブシステムを介してネットワークストレージサーバへアップロードする。ネットワークの通信プロトコルには IEEE1888¹⁴⁾を採用し、時系列データをネットワークストレージサーバに蓄積しつつ、リアルタイム閲覧が可能な Web ブラウザを構築する。

Fig. 3 に設計した同心円 2 重構造の通風筒を示す。通風筒内部にはファンによって風速 3 m/s 以上の風を取り込み、乾球温度計を格納する内側の筒は通風抵抗により 0.3 m/s の風速とすることでセンサへの霧の付着を回避する。さらに同心円構造により外側の筒を通過する 3 m/s 以上の風により内側の筒の日射による温度上昇を防ぐ構造とする。

2.3 噴霧制御アルゴリズムの設計

季節によって気温や VPD、換気の状態が変わるため、制御のアルゴリズムを変更する¹²⁾。本論文においては窓換気の状態は考慮せずに気温の上昇を抑えつつ VPD を一定に保つ制御アルゴリズムを実装する。窓換気も含めて外乱と考え、単純な比例ゲインを用いたフィードバック制御を基本として設計する。柔軟で汎用的な制御手法のため、夏季の高温抑制を主目的としながらも、ほかの季節でも利用できる。

細霧による冷却および加湿は日射過熱の生じる昼間のみで有効であるため、気温の高い昼間に連続細霧発生が可能となるアルゴリズムが望ましい。そこで、噴霧開始設定気温 T_c を設け、施設内の計測気温 T が上昇し T_c を上回った場合に噴

Fig. 4 Relationship among the calculation value, the number of fogging line, and the frequency of inverter

霧を行なうこととする。このとき、制御量は施設内 VPD の D_a であり、あらかじめ設定してある目標設定 VPD の D_{ref} に対して比例制御を行なう。 D_a と D_{ref} の差に適切なゲイン K_p を乗算して得られた制御入力 u を用いて、霧の噴霧圧を決定する。制御式を (4) 式に示す。

$$u = \begin{cases} -K_p(D_{ref} - D_a) & (T > T_c) \\ 0 & (T \leq T_c) \end{cases} \quad (4)$$

制御入力 $u \leq 0$ でインバータユニットは停止する。VPD を D_{ref} に収束させてしまうと制御入力 $u \leq 0$ となりインバータユニットが頻繁に停止する。これでは連続噴霧が実現できないため、VPD は D_{ref} よりも大きな値に収束させる。決定した霧の噴霧圧を実現する周波数をインバータユニットに送る。

低圧噴霧を実現するための噴霧ノズル数の変更は噴霧ライン単位で行なう(以降、噴霧ライン数制御とする)。噴霧ライン数制御アルゴリズムとして、単純線形減少関数に床関数を適用したものをを用いる。比例制御の計算から得られる制御出力を最大値 1 で正規化した u_{norm} から、インバータユニットに与える出力周波数 P_{out} は (5) 式により求められる。

$$P_{out} = P_{max} u_{norm} \text{ Hz} \quad (5)$$

ここで、噴霧の最大出力周波数を P_{max} とする。 P_{out} が噴霧の最低出力周波数 P_{min} を下回る計算結果となった場合は噴霧ライン数を単純線形減少させる。噴霧ライン数 L_{num} は (6) 式で与えられる。

$$L_{num} = \left\lfloor \frac{L_{max} - 1}{P_{min}} P_{out} + 1 \right\rfloor \quad (6)$$

ここで、 L_{max} は施設に設置された噴霧ライン数の最大値である。このとき、インバータユニットに与える周波数出力は最低出力周波数である P_{min} とし、 $u_{norm} \leq 0$ でインバータユニットは停止する。噴霧ライン数とインバータユニットの出力周波数、制御出力の関係を **Fig. 4** に示す。

噴霧ライン制御の際には、噴霧のむらが生じないように噴霧ラインが等間隔となるように選択する。さらに、一定時間

で噴霧ラインを巡回させることで、施設内を均一に噴霧する。

比例ゲインによるフィードバック制御の実装において、噴霧が VPD の減少のみに寄与すること、窓換気が制御できないこと、細霧発生から気温が低下するまでの遅れなどから、VPD の時系列変動が発生することが推測される。そのため、VPD の時系列変動を抑制する制御を検討する必要がある。本研究では、変動の傾きに着目し、比例制御のゲイン K_p の値を VPD の変化傾向によって変えるゲイン調整制御を実装する¹⁵⁾。VPD が上昇傾向にあるときには K_p を大きくして VPD をより多く減少させるよう噴霧量を増やし、VPD が下降傾向にあるときには K_p を小さくして窓換気による VPD の上昇を促すよう噴霧量を減らす。本手法は加算のみ能動的に行なえる制御系において、外乱要因による減算の効果を間接的に増強する。

3. 気温・飽差制御システムの実装結果と評価

3.1 気温・飽差制御システムの実装

計測および制御サブシステムに搭載する CPU は Arduino 社の Arduino Ethernet R3 を採用する。計測センサには半導体センサである Analog Devices 社の ADT7420 センサモジュール（計測誤差 $\pm 0.25^\circ\text{C}$ ）を採用する。センサモジュールは基板およびコネクタが搭載されており、基板には腐食を防ぐためシリコンスプレー（ファインケミカル社 FC-112）で表面をコーティングする。ADT7420 は通常用いられる Pt100 などの白金センサ（Vaisala 社 HMP155）と比較して、計測値の時系列傾向が同一であることを予備実験により確認している¹⁶⁾。湿球温度計と乾球温度計の計測間隔および制御周期は 1s とし、噴霧圧と噴霧ライン数の計算はこの周期で更新される。ただし、評価のために収集するデータは 60s で平均化したものを用いる。

インバータユニットの設定周波数範囲は 0~60 Hz であり、噴霧圧は設定周波数に対応し 0~6 MPa の範囲で変化する。噴霧ライン数制御を開始する最低噴霧圧はインバータユニットの出力周波数 20 Hz（噴霧圧で約 3 MPa）とする。噴霧ライン数の切り替えおよび巡回の間隔は 5s とした。これは、噴霧ラインの停止時に必要となる水抜き作業にかかる時間と同じであり、実装システムが設定できる最小切り替え時間である。インバータユニットの停止からつぎの駆動までの冷却時間遅れを抑えた。 T_c は 25°C 、 D_{ref} は 0.6 kPa、比例制御ゲイン K_p は 2 とした。ここで、比例制御ゲイン K_p は VPD の定常偏差が小さくなるよう実測により選定した。

3.2 実装環境

千葉大学環境健康フィールド科学センター内太陽光型植物工場 5 号棟に提案システムを設置した。Fig. 5 に環境の概略図を示す。施設は、床面積 $1,980\text{ m}^2$ 、軒高 3.9 m、棟高 5.16 m で、トマトの養液栽培を行なっている。施設内を中央で分離し、細霧制御システムを導入した実験区 (ExpArea) と導入していない対照区 (CtlArea) とする。両エリアには計測センサ

Fig. 5 Experimental environment

Fig. 6 Measured dry-bulb temperature (2014/7/27)

を中央部の高さ 1.5 m に配置し、実験区には高さ 2.7 m の位置に 6 本の噴霧ラインを等間隔に設置する。窓は側窓と天窗があり、導入した計測制御システムとは異なる制御系統で自動開閉している。側窓と天窗はともに、雨天を除き施設内気温が 20°C 以上で全開となる設定とした。また、吸気扇が連続運転している。

予備評価として、植物体を撤去し、窓の全開全閉や噴霧の有無による条件付き環境を構築して噴霧試験を実施した。その結果、窓全閉の際の加湿や窓の開閉と連動させた冷却など、湿り空気線図に従う制御が実現されていることを確認した¹⁷⁾。

3.3 フィードバック制御と噴霧ライン数制御の実装結果

比例ゲインによるフィードバック制御と噴霧ライン数制御の効果を示す。Fig. 6 に 2014 年 7 月 27 日の乾球温度の時系列計測データを示し、Fig. 7 に同日の VPD の時系列計測データを示す。この日の、実験区の区画あたりの植物体の蒸散量は $1,228\text{ L/day}$ 、対照区の区画あたりの植物体の蒸散量は $1,226\text{ L/day}$ とほぼ同一であり、植物体の成長状態もほぼ同一とみなせる状況であった。施設内気温はピーク時で約 -5°C の冷却効果を発揮し、VPD は 0.8 kPa 近傍において安定化していることが確認できる。ただし、実験区と対照区の VPD が異なっているにもかかわらず植物体の蒸散量はほぼ同一である。VPD が高い対照区では蒸散がより多くなると推測されるが、気温が約 37°C 、VPD が 3 kPa を超える環境下にお

Fig. 7 Calculated VPD (2014/7/27)

Fig. 8 Inverter frequency at ExpArea (2014/7/27)

いて植物体内の水分損失を防ぐために気孔が閉じたため、蒸散量が変わらなかったと予想される。

Fig. 8 にインバータユニットへ与えた出力周波数の時系列データを示す。グラフから、10:00 ごろから 13:30 ごろまでインバータユニットの出力周波数は 0 より大きく、長時間にわたり連続噴霧されているのがわかる。この間に、施設内の植物体の葉が濡れることはなかった。

これらの結果から、実際の栽培環境において VPD 制御が有効に機能していることがわかる。したがって、連続噴霧制御によって VPD を制御可能な空間を構築できたといえる。

3.4 ゲイン調整制御の実装と結果

Fig. 7 に示すように、2.3 節で推測した VPD の時系列変動が発生している。この時系列変動を軽減するゲイン調整制御を実装する。制御パラメータは、上昇傾向での K_p を 2、下降傾向での K_p を 1 と固定設定とした。夏季高温期の日中快晴、窓は常時全開の環境下で評価した。

Fig. 9 にゲイン調整制御を適用する前の 2014 年 7 月 26 日 (対照日: CtlDay) の時系列データを、Fig. 10 にゲイン調整制御を適用した後の 2014 年 8 月 19 日 (実験日: ExpDay) の時系列データをそれぞれ示す。両日も気温が正午付近にピーク (約 33°C) を有し、日射強度変化がほぼ同じ傾向を示していた。ただし、対照日の D_{ref} は 0.6 kPa 、実験日の D_{ref} は 0.5 kPa とした。また、植物体の蒸散量も実験日が約 $1,957\text{ L/day}$ に対して対照日が約 $1,180\text{ L/day}$ と異なる。

Fig. 9 Measured temperature and calculated VPD at CtlDay (2014/7/26)

Fig. 10 Measured temperature and calculated VPD at ExpDay (2014/8/19)

Fig. 10 と Fig. 9 から、ゲイン調整制御によって VPD 変動が軽減されていることがわかる。平均値が安定しているとみなせる 13:00 から 15:00 における標準偏差が実験日で 0.045、対照日で 0.118 と定量的にも明らかである。さらに、実験日の植物体の蒸散量は対照日に比べて 2 倍ほど多いため、より細かい噴霧調整が必要であると推測されるが、そのような環境下でも変動が軽減されている。

ほかの日と比較しても、ゲイン調整制御による VPD 変動の軽減が見られたが、気温や VPD が低い日ではゲイン調整制御の効果が小さかった。これらの結果より、環境状態によって設定ゲインを調整する必要があるものの、ゲイン調整制御が VPD の安定化に有効に働いたといえる。

3.5 収量への寄与

提案する気温・飽差制御システムの実地での長期運用における効果として、果実収量への寄与を示す。栽培作物はトマトであり、低段密植栽培を実施した。

Table 1 に 2014 年の夏季において、1 作目に 1 段栽培を、2 作目に 4 段栽培を実施した際の栽培条件と収量の成果を示す。表列の見出しにある 1C1S は 1 作目 1 段栽培、2C4S は 2 作目 4 段栽培を表わす。1 段栽培は第一果房のみを収穫したもの、4 段栽培は第四果房までを収穫したものを指す。表中に Cultivar (品種), Planting (定植日), Anthesis (開花開始日), Beginning of harvest (収穫開始日), End of harvest

Table 1 Tomato fruit yield in 2014 summer

	1C1S		2C4S		2C4S	
Cultivar	Momotaro York		Momotaro York		Miku 116	
Planting	7/11		7/14		7/14	
Anthesis	7/25		7/26		7/26	
Beginning of harvest	8/29		9/1		9/1	
End of harvest	9/15		10/22		10/22	
Area	Ctl	Exp	Ctl	Exp	Ctl	Exp
Number of plants	1770	1770	965	905	235	211
Yield	0.497	0.594	1.410	1.591	1.271	1.422

(収穫終了日), Number of plants (栽培株数), Yield (株あたりの収量, 単位は kg) が示されており, 栽培株数と株あたりの収量以外の条件は実験区と対照区で同一である. 期間中の実験区は連続細霧制御が行なわれており, 2014 年 8 月 5 日からゲイン調整制御を行なっている. 1 作目の株あたりの収量は, 実験区で 0.594 kg, 対照区で 0.497 kg と約 20%の収量増加が得られた. 2 作目の株あたりの収量は, 桃太郎ヨークに対して実験区で 1.591 kg, 対照区で 1.410 kg で約 13%の収量増加, 未来 116 に対して実験区で 1.422 kg, 対照区で 1.271 kg で約 12%の収量増加が得られた.

また, 冬季の栽培においても果実収量の増加が見られた. 冬季はトマト品種を冠美, 栽培方法を 4 段栽培, 栽培株数を実験区および対照区それぞれで 1,062 株として実施した. 結果として株あたりの収量は実験区で 1.85 kg, 対照区で 1.73 kg と約 11%の収量増加が得られた. これらの結果から, 夏季および冬季の栽培において提案する気温・飽差制御システムが果実収量の増加に有効である可能性が示唆された.

4. 結 言

太陽光型植物工場における連続細霧発生による気温・飽差制御システムの提案と実装を行なった. 同心円 2 重構造の通風筒の設計製作, インバータユニットの圧力制御とライン数制御, ゲイン調整制御による噴霧速度調整により, 葉濡れを生じない細霧の連続噴霧が実現された. また, 細霧の気化熱により気温を下げつつ VPD を一定の値に制御できていることを確認した. 結果として, 夏季および冬季において植物の果実収量が対照区と比較して 10%から 20%程度増加した.

今後は, オンオフ制御と比較して本システムが有効であることを示す. また, 複数の物理要因を考慮し K_p などの制御パラメータだけでなく T_c , D_{ref} などの制御指令値も考慮した適応制御を検討することで, 太陽光型植物工場にとって最適な気温・飽差制御を実現し, 一般的な施設園芸において活用できる知見を得ていく.

謝辞 本研究の一部は, 平成 24, 25, 26 年度農林水産省緑と水の環境技術革命プロジェクト事業および平成 25, 26, 27 年度公益財団法人新技術開発財団植物研究助成の補助を受けて行なわれた.

参 考 文 献

- 1) 古在豊樹: 人工光型植物工場, オーム社 (2012)
- 2) 古在, 星: 太陽光型植物工場, オーム社 (2009)
- 3) 林真紀夫: 細霧冷房の現状と課題, 施設と園芸, **123**, 8/13 (2003)
- 4) A. Arbel, O. Yekutieli and M. Barak: Performance of a fog system for cooling greenhouses, *J. Agric. Engng. Res.*, **72-2**, 129/136 (1999)
- 5) Handarto, M. Hayashi, K. Ohyama, H. Toida, E. Goto and T. Kozai: Developing control logic for a high-pressure fog cooling system operation for a naturally ventilated greenhouse, *Environ. Control Biol.*, **44-1**, 1/9 (2006)
- 6) 木野本, 松本, 吉田: 細霧冷房装置利用による相対湿度の制御がトマト生体情報および収量品質に及ぼす影響, 栃木農試研報, **71**, 27/31 (2013)
- 7) C. Leonardi, S. Guichard and N. Bertin: High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits, *Scientia Horticulturae*, **84-3**, 285/296 (2000)
- 8) A. Arbel, M. Barak and A. Shklyar: Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses, *Biosystems Engineering*, **84-1**, 45/55 (2003)
- 9) F. Villarreal-Guerrero, M. Kacira, E. Fitz-Rodriguez, R. Linker, C. Kubota, G.A. Giacomelli and A. Arbel: Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling, *Biosystems Engineering*, **111-2**, 217/228 (2012)
- 10) LI-COR, Inc.: LI-610 portable dew point generator instruction manual (1991)
- 11) H. Toida, K. Ohyama, T. Kozai, Handarto and M. Hayashi: A method for measuring dry-bulb temperatures during the operation of a fog system for greenhouse cooling, *Biosystems Engineering*, **93-3**, 347/351 (2006)
- 12) 特定非営利活動法人植物工場研究会: 平成 24 年度緑と水の環境技術革命プロジェクト事業「植物工場の高収量化・高効率生産を IT 等の技術で支援する統合型環境制御システムの開発実証事業」事業実施報告書 (2012)
- 13) 浅野, 渡邊, 嘉数 (大野), 栗本: 植物工場における細霧発生による水蒸気飽差制御システムの構築, 第 14 回 SICE SI 部門講演会, 485/488 (2013)
- 14) 落合秀也: 汎用設備管理向け通信プロトコル IEEE1888, 電気設備学会誌, **32-2**, 147/150 (2012)
- 15) 渡邊, 浅野, 栗本, 糠谷: 太陽光型植物工場における連続細霧発生による気温・飽差制御, 第 15 回 SICE SI 部門講演会, 1988/1991 (2014)
- 16) 島村, 井原, 齋藤, 村上, 渡邊, 浅野, 嘉数 (大野), 栗本: 植物工場における通風筒を用いた半導体センサによる気温の計測, 日本生物環境工学会 2014 年大会, 158/159 (2014)
- 17) 渡邊, 井原, 齋藤, 島村, 村上, 浅野, 嘉数 (大野), 栗本: 植物工場における細霧冷房の評価—気温と水蒸気飽差の計測制御—, 日本生物環境工学会 2014 年大会, 40/41 (2014)

[著 者 紹 介]

渡 邊 孝 一 (正会員)

2006 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了. 2009 年博士課程修了. 同年慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科助教. 2012 年木更津高専情報工学科講師. 2015 年より准教授. テレグジスタンス, 植物工場環境制御の研究に従事. 博士 (情報理工学).

浅野 洋 介 (正会員)

2004 年横浜国立大学大学院工学府物理情報工学専攻修士課程修了，2008 年博士課程修了。2004 年木更津高専電気電子工学科助手，2008 年助教，2012 年講師，2014 年より准教授，現在に至る。ビジュアルサーボシステム，無線通信制御，植物工場環境制御の研究に従事，博士（工学）。

栗本 育三郎（正会員）

1983 年長岡技術科学大学大学院・修士課程修了。同年(株)島津製作所勤務。87 年木更津高専・助手，講師，助教授を経て 2005 年より教授。96 年東京大学計数工学科研究員。2009 年博士(情報理工学)。人工現実感，生体信号解析，植物工場の統合環境制御の研究に従事。

糠 谷 網 希

2012 年静岡大学大学院農学研究科修士課程修了。同年(株)大仙入社。2013 年より農林水産省植物工場実証・展示・研修事業千葉大学拠点にて千葉大学との共同研究による太陽光利用型植物工場におけるトマトの生産性向上に関する実証、研究に従事。

狩 野 敦

1985 年米国 Texas A&M 大学, Soil and Crop Sciences 学科卒業 (Ph.D.). 86 年横河電機 (株) 入社. 88 年静岡大学農学部, 2003 年ダブルエム研究所, 2014 年より (株) ダブルエム代表取締役. 千葉大学特任教授. 温室環境制御システムの開発などに従事.

丸 尾 達

1981年千葉大学大学院園芸学研究科園芸学専攻修士課程修了，千葉大学助手，助教授を経て2013年より教授。84年東京大学農学部研究員，2002年博士（農学）。蔬菜園芸学，施設栽培学を専門とし，施設園芸，シードテクノロジー，苗生産，植物工場などの研究に従事。

|||||