

研究紹介

施設栽培における潜熱利用に関する
コンピュータ利用技術の開発

安場 健一郎

(応用植物科学コース)

Development of a new computer-assisted
technique for efficient usage of latent heat
with computer system

Ken-ichiro Yasuba

(Course of Applied Plant Science)

In protected horticulture, cooling techniques with latent heat has been effective for improving the growth of various kinds of plants in the summer season. It was necessary to understand special knowledge of the VETH diagrammatic drawing for effective operation of cooling with latent heat. In order to obtain the information from VETH diagrammatic drawing, it was necessary to perform a lot of calculations. It was difficult to obtain such information simply. So, a device and software were developed for getting effective information in order to manage cooling of latent heat. The developed device and software were run on the Ubiquitous Environment Control System (UECS). The rules for controlling the environment of UECS were set up on a web site, and an information communication technique was used for controlling the environment. The developed ventilation calculated node gathered the necessary information from the other nodes via LAN automatically. The node calculated valuable information for cooling with latent heat, including the ventilation rate, and sent the calculated values, after entering the constant parameters using an http server, which was installed in the node. The developed software was run on a personal computer. The software could be used after describing various information for calculating ventilation rate and evaporation rate at the setting file. It calculated these values, and users were shown the data using graphs and text files. As a result, we could get effective information concerning cooling latent heat fairly easily by using of the developed node and the software.

Key words : latent heat, computer, fogging, ubiquitous environment control system

緒 言

日本の気象条件で夏季に施設栽培を実施するためには、しばしば高温対策が必要となる。近年は、空気熱源

式のヒートポンプが普及し夜間冷房に活用されている。しかし、夏季の日射量をヒートポンプで取り除くためには、ヒートポンプを多数導入する必要がある。強度の遮光を前提としなければ、ヒートポンプの利用は現実的ではない。そのため、夏季の高温対策としては、遮光や潜熱を利用した冷却が中心となる。遮光は、栽培を行う際に光を多く必要としない植物にとっては有効な高温対策となるが、果菜類の多くは遮光すると減収する。こういった作物の栽培には潜熱による冷却が有効となる。

潜熱冷却は水が蒸発する際に奪われる気化熱を利用した冷却方法である。気化熱を利用した温室全体の冷却方法は、細霧冷房法やパットアンドファン法などがある。また、根圏の冷却方法としては、固化培地を使用した方法、紙ポットを利用した方法¹⁾、通気防水性資材を用いた方法²⁾などが提案されている。

温室全体の冷却方法として、夏季の日中の冷房方法としては細霧冷房の普及が期待されている³⁾。細霧冷房の利用によって、シクラメンの生育促進⁴⁾、キュウリの収量増加⁵⁾、シンビジウムの開花促進⁶⁾などが報告されている。しかし、潜熱冷却の特性として換気を併用しなければならないこと、適正な噴霧量を把握することが難しいことがあげられる。潜熱冷却を効率的に実施するためにはVETH線図の利用が有効である⁷⁾。VETH線図は温室内部での水の蒸発量、温室の換気率、温室内外の気温と湿度の関係を表した線図であるが、湿り空気に関する専門知識が必要であり簡単に理解することは難しい。そこで、VETH線図で得られる情報を簡単に計算するソフトウェアが開発されている⁸⁾。また、VETH線図を利用することで計算が可能な換気率を利用した細霧の噴霧方法を行うことで効率的な冷却が可能であるとの報告例がある^{9,10)}。しかし、VETH線図で得られる情報による環境制御を一般的な生産施設に利用できるようにするためには、一般的な環境制御システムで利用できることが重要であろう。

近年、植物工場が注目され、コンピュータを利用した温室の環境制御技術が注目されている。さまざまな環境制御システムがある中で、ユビキタス環境制御システム(UECS)は日本で開発された自律分散型の環境制御システムであり¹¹⁾、植物工場などでの普及が進んでいる。UECSは環境制御を実施するための情報交換の方法が公開されている汎用的な環境制御システムである。潜熱冷却のように効率的な制御を実施することが難しいものについては、コンピュータを有効活用することが望ましく、細霧冷房を支援するUECS対応機器の開発、ソフトウェアの開発を行った。

材料および方法

UECS の概要

UECS ではイーサーネットの規格のうちユーザデータグラムパケット (UDP) のブロードキャスト通信を利用して環境制御が実施される。UECS では環境制御機器にそれぞれ IP アドレスが付与され、環境制御機器自身が保有する情報を共有するためのローカルエリアネットワーク (LAN) を構築して機器同士が情報通信を行っている。各機器が必要な情報を LAN から入手して、機器に搭載されたコンピュータが自身の動作方法を判断する自律分散型の環境制御システムである。通信文は World Wide Web Consortium で勧告された Extensive Markup Language (XML) で記載されている。センサによる測定情報、環境制御機器の動作情報、環境制御機器を遠隔操作するための情報すべてが XML の形式に則った同じフォーマットの通信文で記述されている。UECS の通信文の送受信のルールを定めた、UECS 通信実用規約 1.00E-10 がインターネット上に公開されている。

温室での細霧冷房運用を支援する情報を送信する細霧冷房支援ノードの開発

開発したノード (UECS に準拠した環境制御機器をノ

ードと呼ぶ) のハードウェアは動作クロックが 20MHz の CPU (H8/3048F-ONE, ルネサステクノロジー) とイーサーネット用のコントローラーなどが搭載されたマイコン基板 (USE, ステラグリーン) を使用した。開発した機器は、熱収支法によって換気率を推定するために必要な情報を、UECS を導入した LAN から入手し、入手した情報を UECS の通信規約に則った通信文として LAN に送信する機能を搭載している。開発したノードは UECS に接続されている他の機器から送信された、屋外気温、屋外相対湿度、屋外日射量、屋内気温、屋内相対湿度、遮光カーテン開度の情報を受信する。また、利用者に温室の被覆資材の熱貫流率などのパラメータを設定させるようにするための、http サーバをノードに搭載した (Fig. 1)。設定値と受信値を利用して、温室内外の熱収支によって換気率を計算することとした。換気率の他に、温室内での蒸発散速度、細霧噴霧時の冷却限界温度、目的の気温にするための細霧の噴霧速度を計算する。ノードの動作に関する検証は愛知県武豊町にある野菜茶業試験場内の UECS 導入温室において行った。

温室の換気率を計算可能な統合環境制御を支援するソフトウェアの開発

UECS を導入した施設で利用可能な統合管理ソフトウェアを開発し、ソフトウェアの機能の一つとして温室の換気率の計算機能を組み込んだ。ソフトウェアは UECS 通信実用規約 1.00-E10 に準拠した通信文を収集するソフトウェアで JAVA TM SE Runtime 6 (Oracle) をインストールしたパーソナルコンピュータ上で動作するようにした。プログラムの開発言語には JAVA TM SE Development Kit 6 (Oracle) を使用した。ソフトウェアは即時的なデータ通信用に UECS の通信規約で規定されている UDP の 16520 番ポートを占有する仕様とした。

ソフトウェアはテキスト形式のファイルである test.xml の情報にしたがって動作する。test.xml ファイルには、ソフトウェアで管理する受信通信文の情報、日報やアラートに関する電子メールを送信するための情報、受信した通信文に記載された情報をグラフ化するための設定情報などをユーザーが記載する。その他に、受信した気温と相対湿度に関する通信文から飽差、エンタルピー、絶対湿度を計算するための情報、換気率を計算するための情報などを記載すれば、ファイル内での設定内容によって、各種の計算を実施し、計算値はソフトウェアによって記録される。

換気率を自動的に計算させるためには Fig. 2 のような設定ファイルを記述する必要がある。設定ファイルは xml で記載する。ファイル内の ROOT タグ内に必要な情報すべてを記載する。ROOT タグの PRESET_CCM タグ内に、UECS の LAN から換気率等を計算するために受信が必要な通信文の情報を記載する。温室内外の気温・湿度、屋外の日射量を入力する必要があるため、こ

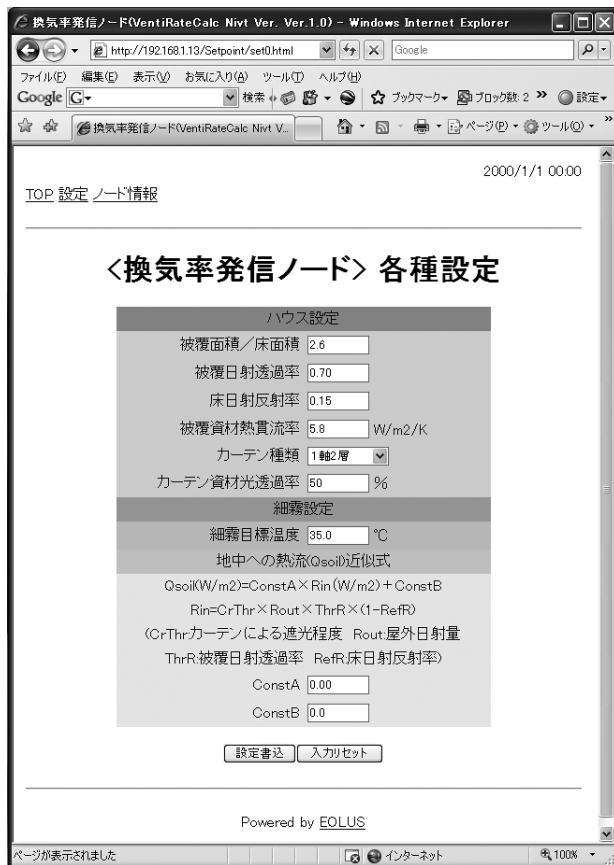


Fig. 1 WEB page to set the parameters for calculating ventilation rate is served by the developed node.

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<ROOT>
<PRESET_CCM>
<DATA type="InAirTemp" room="1" region="1" order="1" priority="29" name="内気温"/>
<DATA type="InAirHumid" room="1" region="1" order="1" priority="29" name="内湿度"/>
<DATA type="WAirTemp" room="1" region="1" order="1" priority="29" name="外気温"/>
<DATA type="WAirHumid" room="1" region="1" order="1" priority="29" name="外湿度"/>
<DATA type="WRadiation" room="1" region="1" order="1" priority="29" name="外日射"/>
</PRESET_CCM>
<VENTILATION>
<CONST lightThrRate="0.7" lightRefRate="0.15" thermoThrRate="5.8" ratioFilmToFloor="2.6"/>
<RECVVALUE inAirTemp="内気温" inAirHumid="内湿度" wAirTemp="外気温" wAirHumid="外湿度"
wRadiation="外日射"/>
<VENTI>
<DATA name="温室換気率" room="1" region="1" order="1" priority="29"/>
</VENTI>
<EVAPO>
<DATA name="温室蒸発散速度" room="1" region="1" order="1" priority="29"/>
</EVAPO>
</VENTILATION>
</ROOT>

```

Fig. 2 Descriptive content of setting file to calculate ventilation rate and evaporation rate with the use of the newly developed environmental controlling software.

これらの情報を記載する。

VENTILATION タグ内には CONST, RECVVALUE, VENTI, EVAPO タグを記載することで、1分おきに最新の環境情報の受信値にしたがって換気率と蒸発散速度の計算をソフトウェアが行う。CONST タグは、温室の光透過率、床面の光反射率、被覆資材の熱貫流率、温室の被覆面積を床面積で割った値など、換気率を計算する温室固有の情報を記載する。RECVVALUE タグには PRESET_CCM タグで登録した情報と換気率を計算するために必要な情報と結びけるための情報を記載する。VENTI タグと EVAPO タグは計算した情報を UECS の通信文の形式でソフトウェアに記録させるための情報を記載する。この設定ファイルを記述しソフトウェアを起動すると、必要な通信文を自動的に収集し、設定ファイルに記述されたパラメータを利用して、1分おきに温室の換気率を熱収支法によって計算する。

計算した値はソフトウェアで管理する受信通信文と同様の利用が可能で、テキストファイルで保存したり、グラフを作成したりすることが可能となる。

結果および考察

換気率計算ノードの動作状況

換気率計算ノードが計算した値を2008年6月15日に収集した。ノードを設置した温室は、愛知県武豊町の野菜茶業試験場内にある実験温室（南北長さ36m×東西長さ27m×軒高3.5m）で、2.2mの高さに設置されたワイヤで誘引するトマトの長期多段栽培を実施中であった。温室では23℃を目標として天窓を開閉した。気温、湿度、屋外日射量はそれぞれ、サーミスタ、湿度センサ（TA 503, (株) トップラスエンジニアリング）、全天日射量センサ（JSS-200, (株) 日本オバレータ）が実装された UECS のノードが発信した。発信された情報を換気率計算ノードが値を収集し、換気率等を計算し、UECS の情報収集用のソフトウェアを用いてデータ収集した。

1分おきに収集した情報を Fig. 3 に示した。なお、換気率や蒸発散速度が負の値となる場合のデータは除いた。換気率 (Fig. 3 A) は、換気窓が閉まっている時間帯（朝方、午後）は低くなり、換気を実施している時間帯（特に午前）は高くなった。このことから、熱収支法による換気率の測定は高精度は期待できないが、ノードが発信する換気率の変動に関しては換気の状態を反映していたと考えられた。蒸発散速度 (Fig. 3 B) は、低日射量の時間帯（朝方、夕方）は低くなり、日中には高くなった。日射量が低い時間帯は気孔開度が小さくなると考えられるが、そのような時間帯には蒸発散速度が低く計算されていたと考えられた。温室内の蒸発散の状態も開発したノードの計算値によって反映されていると考えられた。細霧冷房を実施した場合の冷却限界温度は Fig. 3 C のように推移し、換気率が大きい時間帯に予想気温が低くなる傾向があった。細霧冷房を効率的に実施するためには換気が十分にあることが必要であるため、予想気温が低くなったと考えられる。冷却限界気温にするために必要な蒸発量は (Fig. 3 D)、換気率の大きい時間に高くなる傾向にあった。換気によって温室内の飽差が低下し、乾燥状態になるため、この結果についても妥当であると考えられる。

細霧冷房を導入する前に、導入予定の温室でどの程度まで気温を低下させることが可能で、どの程度の噴霧能力のある細霧冷房装置を導入すればよいのかを開発したノードを利用することで、推察できると考えられた。

また実際に、熱収支法を利用して計算した換気率や蒸発散速度を利用して、温室内での細霧の噴霧を効率的に実施しようという試みが行われている^{8,9)}。現状、そこまで高度な制御を実施するほど精密な環境制御は実用化されていないが、温室の環境制御へのコンピュータ利用がより身近になれば、このような手法を用いた環境制御の普及も期待される。

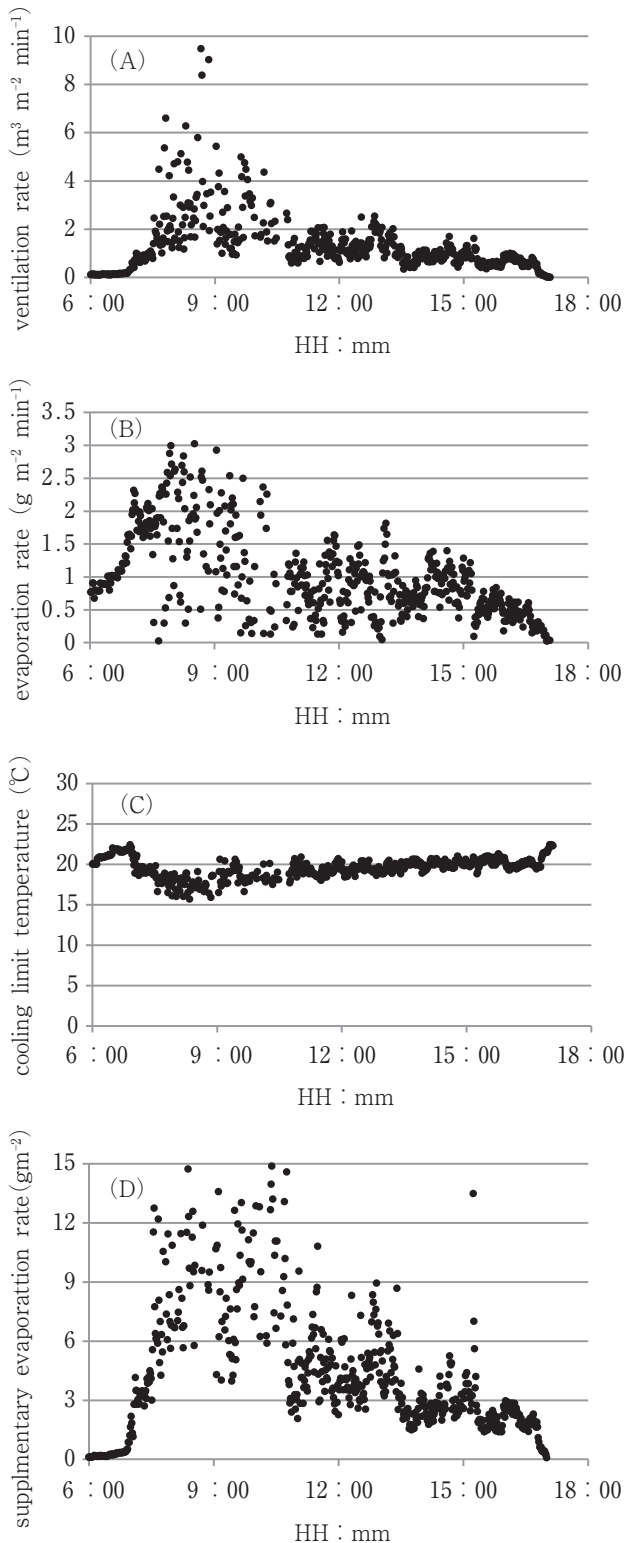


Fig. 3 Changes in the calculated values using the developed ventilation calculated node. (A) ventilation rate, (B) evaporation rate, (C) cooling limited temperature in fog cooling, (D) supplementary evaporation rate for fog cooling at the limited temperature.

統合管理ソフトウェアでの換気率等の計算

また、換気率や蒸発散速度を計算するための機能をUECS用の統合管理ソフトウェアに組み込んだ。得られる情報に関しては、換気率計算ノードと同じであるため示さないが、ノード同様の有用性があると考えられる。ソフトウェアはjavaで作成しているため、javaを搭載したパーソナルコンピュータ(PC)上で動作させることができる。近年は、PCを利用せずに組み込み型のマイクロコンピュータにおいてもlinux等のOSが動作しjavaのヴァーチャルマシンを動作させることが可能となっているため、精密機器を長期間運用することが難しい温室内の環境においても、ソフトウェアを利用することが可能になったと考えられる。

潜熱利用技術に関するコンピュータ利用に関して

潜熱を利用した環境制御を合理的に実施するためには、湿り空気概念を理解する必要がある。しかし、湿り空気の考え方は高度な専門性を有し、一般の生産者が理解することは難しい。細霧冷房などにより潜熱冷却を効率的に実施するためにはVETH線図を理解する必要があり、さらに高度な専門性が必要となる。

コンピュータの利用によってこれらの解決が図られたならば、日本のように施設で栽培する際に夏季の高温が問題となる地域において、有効な潜熱冷却技術が普及する一助になると考えられる。一方、環境制御に関する情報が公開されているUECSに準拠して開発している。UECSは2011年に発生した東日本大震災での被災した地域の園芸施設にも導入され、特定メーカーに左右されない共通プラットフォームで施設の規模を問わず導入可能な環境制御システムとして普及が期待されている¹²⁾。UECSに準拠することで異なるメーカーによって構成されたシステムにおいても開発したソフトウェアやノードが利用可能であり、汎用的に利用することが可能であると考えられた。

今回、ハードウェアも含めた換気率計算ノードの開発と、ソフトウェアのみの開発事例を示したが、近年は、linuxのようなOSが搭載されたPCに近い組み込みマイクロコンピュータが安価で入手可能となっており、今後は後者のソフトウェア的な解決が重要となると考えられる。

要 約

施設園芸生産において、夏季の高温対策のうち水の気化潜熱を利用した冷却技術は様々な作物で生育改善効果が認められている。しかし潜熱冷却を効率的に実施するためにはVETH線図に関する専門知識が必要となる。またVETH線図によって情報を得るためには数多くの計算が必要となり、簡便な利用は難しい。そこで、コンピュータを利用して潜熱冷却を支援する機器およびソフトウェアを開発した。開発機器及びソフトウェアは、情報

通信により環境制御を実施し、環境制御を実施するための方法が公開されているユビキタス環境制御システム上で動作させる仕様とした。換気率計算ノードは、ノードに搭載された http サーバを利用して定数を設定すると、自動的に環境制御システムの他の機器から必要な情報を収集し、換気率など潜熱冷却を実施するために有用な情報を計算し、LAN に送信する。換気率を計算するソフトウェアはパーソナルコンピュータ上で動作し、設定ファイルに換気率や蒸発散速度を計算するために必要な情報を記載することで、自動的に計算を実施し、グラフやテキストファイルなどでリアルタイムに把握することが可能である。これらことから、UECS 導入環境であれば、潜熱冷却にとって有用な情報を開発した機器やソフトウェアを利用して簡単に入手できることが可能となった。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、東北農業研究センター、野菜茶業研究所（武豊）、野菜茶業研究所（つくば）、中央農業研究センターの職員並びに関係者の皆様から多大なるご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 荒木陽一：蒸発潜熱を利用した紙ポット育苗の花芽分化促進技術。農業技術体系 野菜編 3. 418 の pp. 58-68, 農山漁村分化協会, 東京 (2006)
- 2) 安場健一郎・屋代幹雄・松尾健太郎：多孔質フィルム生ダクトを使用した冷却チューブによるハウレンソウの根域冷却。園芸学会雑誌, **75**, 109-115 (2006)
- 3) 林真紀夫：細霧冷房方式。5 訂施設園芸ハンドブック, pp. 146-149, 日本施設園芸協会, 東京 (2003)
- 4) 片岡圭子・小西 剛・西川浩次・札埜高志・森田隆史：夏期のガラス温室における室内気温低下への細霧冷房の効果。京大農場報告, **10**, 7-12 (2001)
- 5) 松沼俊文：施設キュウリの細霧による病害への影響と温熱環境の改善効果。農業および園芸, **81**, 400-404 (2006)
- 6) 大澤梅雄・福田正夫・宇都宮裕人：シンビジウムの生育・開花に及ぼす高圧細霧冷房の影響。愛知県農業総合試験場研究報告, **32**, 75-182 (2000)
- 7) 三原義秋：温室冷房。温室設計の基礎と実際 (三原義秋編著), pp. 160-169, 養賢堂, 東京 (1980).
- 8) 福田裕貴・林真紀夫：蒸発冷却法用 VETH 線図ソフトウェアの開発。農業情報研究, **13**, 203-212 (2004).
- 9) 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 in Biology*, **44**, 1-9 (2006)
- 10) Handarto, M. Hayashi, E. Goto, and T. Kozai. Experiment verification of control logic for operation of a fog cooling system for a naturally ventilated greenhouse. *Environ. Control in Biology*, **45**, 47-58 (2007)
- 11) Hoshi, T., Y. Hayashi and H. Uchino. Development of a decentralized, autonomous greenhouse environment control system in a ubiquitous computing and internet greenhouse environment. *Proceeding of 2004 AFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture*, 490-495 (2004)
- 12) 高市益行：地域振興と施設園芸。スマート農業。pp. 176-178. 農林統計出版株式会社, 東京 (2014)