

ユビキタス環境制御システムによる施設園芸生産の ICT 化

はじめに

東海大学開発工学部生物工学科
星 岳彦



ガラス温室・ハウス、養液栽培システム等を組み合わせた施設園芸生産では、植物体地上部・根圏の環境を、屋外圃場より比較的自由に制御して、思い通りの品質の植物を生産することが可能である。また、建屋や栽培ベッドによって内外が明確に区分されているので、物質やエネルギーの外界との出入りを厳密に管理することも可能である。しかし、制御・管理すべき項目は極めて多く、しかも、これらは複雑に関係している。日本において、競争力強化のため、園芸施設の大型化、植物工場生産を標榜した周年生産化、コスト低減と生産性向上の要望が近年大きくなっている。したがって、一植物生産分野として今後も生き残っていくためには、一個人・一家族が人手で対応できるレベルでは既になくなりつつある。つまり、低コストで高速・大量の情報処理が可能な ICT を、生産管理、意思決定支援に積極的に使っていかななくてはならない状況である。

ユビキタス環境制御システムは、ガラス温室・ハウス内の各種機器を低コストにインテリジェント化し、それらを LAN でつないで、自律分散的に計測制御する技術である。これらは、インターネットで使用されている通信規格と同じ規格で動作するように設計されているので、PC、携帯情報機器等の各種アプリケーションソフトウェアとの連携も容易である。本システムを導入することによって、施設園芸生産システムを資材調達、労務管理、出荷販売、経営管理、安全安心の各 ICT システムと連携させることも可能になる。2006 年 3 月に開発がほぼ終わり、実用化のフェーズに入ってから 2 年強が経過し、各種のユビキタス環境制御システム対応機器が開発されると共に、生産施設への導入が徐々に進んでいる。

本稿は、ユビキタス環境制御システムの特徴と現状について、農業情動的な側面から解説するために、末尾の参考文献で言及した内容を再構成し、まとめたものである。

ユビキタス環境制御システム(UECS)とは何か

ユビキタス(ubiquitous)という語は、最近よく耳にする言葉である。コンピュータ関連での使用の始まりは、1993 年にゼロックスのウェイザー氏が論文で、「ユビキタス・コンピューティング」という語を使用したことに遡る。これは、ワンチップマイコンに代表される低コスト小型コンピュータをあらゆる機器や場所に内蔵して相互に通信できるようにして、我々の生活に革新的な変化をもたらそうという提案である。この発想を施設園芸の環境制御システムに導入し、どの環境制御機器やセンサにもコンピュータを内蔵しており、それらが自律的にしかも協調して環境制御をするようにしようと考えたのが、ユビキタス環境制御システムである。その英文表記である Ubiquitous Environmental Control System の頭文字 UECS をとり、「ウエツ

プロフィール

1994 年千葉大学大学院自然科学研究科修了、博士(学術)。現在、東海大学開発工学部生物工学科教授。専門は、植物生産工学、植物環境調節工学。農業情報学会理事、アジア・太平洋 食・農・環境情報拠点(ALFAE)理事、スーパーホルトプロジェクト(SHP)協議会総合システム部会長、ユビキタス環境制御システム(UECS)研究会会長。ホームページは、<http://www.fb.u-tokai.ac.jp/home-j.html>。

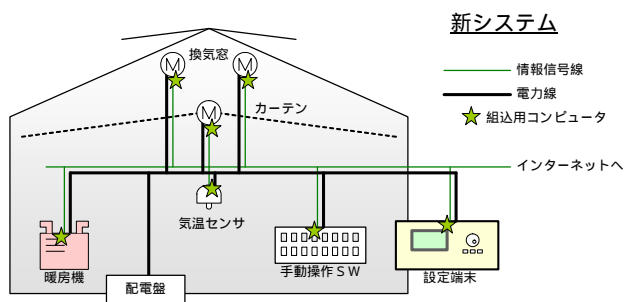
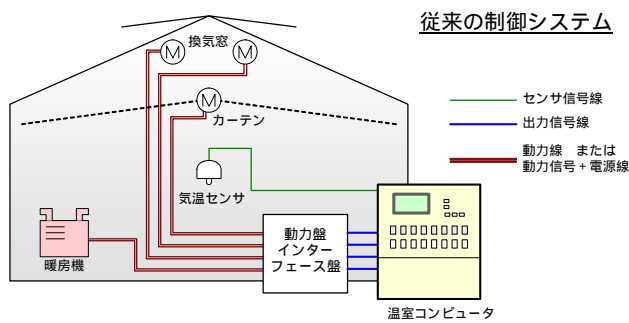


図1 従来の環境制御システムとユビキタス環境制御システム(新システム)の構成の違い(林ほか、2004)

クス」と発音する。

これまで、1個数百円程度のワンチップマイコンを1個だけ使用し、それが内蔵された多数のスイッチのついた制御盤様の高価な筐体に収めたものを、環境制御専用コンピュータとして1台数十万円～百万円程度で製品化していた。これが温室コンピュータと呼ばれる従来型の集中型環境制御システムの心臓部である。このようなシステムでは、図1の上で示した通り、一箇所にある温室コンピュータに、施設の全ての機器とセンサの電力線と信号線を配線する必要があった。しかも、様々な規格の種々雑多な種類のケーブルを広い温室に配線工事し、さらに、個別設計の複雑な電力盤やインターフェース盤の製作・設置工事を行うことが必要であった。そして、温室コンピュータは、できるだけ多くの種類の温室に1機種だけで導入できるようにしたいという製造会社の思惑のために、入出力点数や制御機能が、導入可能な園芸施設に設置される全ての機器の上限仕様に合わせて設計されている。このため、多くの施設ではオーバースペックになってしまっていた。反対に、その仕様で定められた接続可能機器・センサの点数が1点でも超過すれば、1ランク上の温室コンピュータに全交換するしかなかった。結果的に、低コストで製品化することが難しい特徴を持っていた。

市場規模を考えない参入企業の乱立で量産効果が得られずに価格が安くならず、ハードウェア中心の開発で生産に有益なアプリケーションソフトウェアが貧弱になってしまった。そして、扱う情報の共通規格化を積極的に行わなかったため、



図2 UECS用に開発された低コスト組み込み用コンピュータ基板(USE) (星、2006b)

栽培、労務管理、経営等の電子システムと連携させて、生産性・収益性の向上に結びつけることができず、単に環境制御の面だけでコストパフォーマンスを満足できる、大面積・重装備の施設のための導入に留まってしまった。その結果、コンピュータを用いた施設園芸用環境制御システムの普及が始まったのは、日本では1980年代の前半からであったにもかかわらず、その普及面積は、20年余が経過した2003年で557ha、率にしてわずか1.08%であった。つまり、園芸施設のトップ約1%の導入に留まってしまっていたのであった。

日本における床面積5,000 m²以上のガラス室・ハウスは、僅か1,703棟、全棟数の0.15%しか設置されていない。欧米の園芸施設と比較して、日本の施設規模はまだ小さいのが現状である。このような日本の状況で、前述した開発実用化戦略の環境制御システムが成功することはきわめて難しかった。事実、多数あった日本の製造会社、機種は激減しており、現状では、耐用年数経過後の買い替え需要にさえ対応することができず、一時代前の個別の制御装置に戻してしまっているケースすら珍しくない。導入の必要性が極めて高い、1ha以上の施設に対応する環境制御システムについても、製造会社の体力の消耗から新規の製品開発がほとんどなされておらず、海外製造会社の独壇場になってしまっている。このような問題点を解消し、規格化、電子化、低コスト化に寄与する新システムについて議論を重ねた結果、自律分散型にするしかないという結論になった。つまり、組み込み用コンピュータと呼ばれる低価格小型のコンピュータ(図2)を機器・センサに内蔵し、その機器・センサに固有の計測制御を行わせる。そして、組み込み用コンピュータを園芸施設内コンピュータネットワーク(LAN)で相互に接続し、他の機器・センサに関する情報が必要であれば、これを用いて通信する。このような、機器・センサに組み込み用コンピュータを内蔵した装置を、ノード(node)と名付けた。こうして、コンピュータによる環境制御システムが温室に遍在するようになるので、これをユビキタス環境制御システム(UECS)と名付けたのである。

```
<?xml version="1.0"?>
<UECS>
<DATA type="inAirTemp" room="1" region="2"
order="0" priority="15">18.3</DATA>
</UECS>
```

図3 CCM パケットで通信される内容例

UECS の自律分散協調のための通信方式

UECS の開発にあたり、まず、ノードを接続する LAN の通信方式に何を採用するかが大きな問題であった。施設園芸における分散型制御システムの最初の事例として採用された LonWorks、農業機械分野で利用が提唱されている乗用車系の Can、計測制御で使用される DeviceNet、FieldBus などを検討した。しかし最終的に、規格がオープンであり、極めて小さな投資で開発可能な規格として、インターネットで広く使われる Ethernet (IEEE 802.3) が、規格のオープン性、対応部品の価格、規格の継続性、通信速度などの点で、今回の開発目的と最も良く合致していると考え、この規格の採用を最有力として検討した。開発に着手した時点で、「パケット制御に CSMA/CD を使用して制御に使うには即時性・信頼性が低い」、「プロトコルやソフトウェアツールが公開されていて安全性に問題がある」などの異論が共同研究企業から続出し、激論を重ねた。

Ethernet によるネットワークの負荷試験、数ヶ月の長期動作試験などを実施し、UECS の通信規格として大きな問題が出なかったため、結局、異論を押し切って Ethernet を採用した。後述する野菜茶業研究所での実証試験システムでは、市販の安価なネットワークカメラや農業センサーグリッドとして注目されているフィールドサーバなども UECS 用の温室 LAN に接続して共存でき、また、連携した動作も可能など、デファクトスタンダードになっている Ethernet を採用したことによって、結果的に大きなアドバンテージがあったと考えている。また、インター

ネットに接続して PPTP、PacketiX (SoftEther) などの VPN 技術を利用したノードの遠隔保守なども、汎用のソフトウェアをそのまま使用して容易に実現できた。残された規格の問題点としては、有線での接続は 10Base-T を用い、トポロジーがスター型のため、ノード増設時に HUB や新たな配線が必要になることである。これに対して、カスケード接続可能なように、組み込み用コンピュータにネットワークを 2 ポート用意することも検討している。

Ethernet を介して行われるノード間の計測制御の通信規格には、XML と UDP・TCP/IP という一般的な通信プロトコルを使用した共用通信子 (Common Corresponding Message: CCM) を使って行う。共用通信子の例を図 3 に示した。図 3 では、1 号温室の区画 2 の標準的な優先順位の気温センサの計測値が 18.3 であることを示している。UECS のノードは、相互に CCM を交換し協調して計測制御をおこなう。また、LAN に接続されたパソコン等から、この CCM を送受信することで、UECS と連携することは容易である。このほかにも、利用者が Web ブラウザを使用してノードの直接呼び出し設定等を行うための HTTP のプロトコルも用意されている。

UECS で規格化されている通信プロトコルを表 1 に示した。現場での設置工事において、パソコン等を使ったノードの関連付け設定作業は、煩雑で手間もかかるのでできるだけ避けたい。そこで、UDP のブロードキャストパケットを多用するとともに、図 2 でも判る通り USE に DIP スイッチを設けた。DIP スイッチの設定だけで、小規模な施設での複数ノードの系統割付作業等がパソコン無しで実施できるようにした。しかし、ブロードキャストパケットは、ネットワークのセグメント(サブネット)を越えて伝達できないので、多棟の大規模施設で屋外気象ノードからの CCM を共有する場合などに使用するための、CCM のゲートウェイやブルータなどの開発にも着手している。また、ノードの監視、設定は HTTP を採用したので、一般の Web ブラウザを使用するだけで、特別なソフトウェアは不要である。

各ノードは、次の(1)~(3)の優先順位で階層的に動作させるべきであると規格化されている。ここで送信される指定された強制動作とは、運転停止、制御設定値、参照すべき計測値な

表 1 UECS で採用されている通信規格(一部) (星, 2007a)

プレゼンテーション層	セッション層	トランスポート層	ネットワーク層	内 容
CCM レベル A (XML)	データ送信 CCM	UDP Port: 16520	IP ブロードキャスト	定時 CCM 通信
CCM レベル B (XML)	データリクエスト CCM	UDP Port: 16520	IP ブロードキャスト	必要時 CCM 通信
	データ送信 CCM	UDP Port: 16520	IP ブロードキャスト	
CCM レベル C (XML)	データリクエスト CCM	UDP Port: 16520	IP ユニキャスト	必要時特定ノード CCM 通信
	データ送信 CCM	UDP Port: 16520	IP ユニキャスト	
	データ受け取り CCM	UDP Port: 16520	IP ユニキャスト	
CCM サーチ (XML)	提供者サーチ	UDP Port: 16521	IP ブロードキャスト	CCM 提供者検索
	提供者応答	UDP Port: 16521	IP ブロードキャスト	
ノードスキャン (XML)	ノードスキャン要求	UDP Port: 16529	IP ブロードキャスト	存在ノード検索
	ノードスキャン応答	UDP Port: 16529	IP ユニキャスト	
要素スキャン (XML)	要素スキャン要求	UDP Port: 16529	IP ユニキャスト	特定ノード送信 CCM 一覧
	要素スキャン応答	UDP Port: 16529	IP ユニキャスト	
Web ページ (HTML, CGI)	HTTP	TCP Port: 80	IP ユニキャスト	ノードの設定、動作監視

どである。

(1)強制制御: この CCM を受信すると指定された強制動作を行う。受信後 3 秒を経過すると解除される。手動自動切換えスイッチノードや遠隔操作などで使用する。

(2)上位制御: この CCM を受信すると指定された強制動作を行う。受信後 3 分を経過すると解除される。パソコンによる複合環境制御ソフトウェアによる分散動作などで使用する。

(3)自律制御: (1)(2)の CCM を受信していない場合は、ノードに内蔵されたソフトウェアによって自律的制御を実施する。ただし、制御に必要な計測値などは、CCM から入手する。

この仕組みにより、軽装備施設では、(3)の動作でノードの組み合わせだけでパソコン不要の自律制御が低コストで可能である。一方、多数の機器を協調させた植物工場などの高度な生産施設における複合環境制御の実現は、パソコンで制御アルゴリズムに基づいて(2)の CCM を送出するソフトウェアを

開発するだけでよい。このため、安価なパソコンが一台あれば複合環境制御の専用ハードウェアは不要で、単なるパソコンのアプリケーションソフトウェアとして開発、流通が可能である。さらに、利用者は、施設内の任意の場所で、携帯している手動自動切換えスイッチノード等を LAN に接続し、(1)の CCM を送出するだけで任意のノードを遠隔操作することができる。これは、機器の設置調整などに威力を発揮する。さらに、タイムアウトにより、何らかの障害によって上位制御が不能になっても、自律制御に自動的に戻って最低限の制御が継続されるので、安全性が高い。

汎用機器の利用とソフト開発の容易さ



図 4 携帯用ゲーム機を使用して UECS の機器を遠隔操作している例(有)エヌアイシステム林氏提供)



図 6 野菜茶業研究所の黒崎氏が開発した UECS の動作を監視し、メールや Web ページを使って報告する総合監視サーバ(星, 2007c)



図 5 パソコンで各 UECS ノードの状態を一覧表示し、計測制御データをデータベース化する UECS モニタ(星, 2007c)



図 7 総合監視サーバが生成した Web ページを携帯電話に表示させて温室気温の遠隔監視を行っている例(星, 2007c)



図8 UECSが導入された大規模イチゴ生産ハウス((有)エヌアイシステム林氏提供)

施設園芸の各種機器に低コスト組み込み用コンピュータ基板(USE)を内蔵して、各社が UECS 対応機器の開発を容易に可能にする技術として苦心したのが、UECS で定めた通信規格に従ったノードの基本動作を実現するミドルウェア(Embedded Operating Library for Ubiquitous-control System: EOLUS)の開発であった。EOLUS は、オープンソースのライブラリである openTCP を採用し、ライセンスフリーの統合開発環境である eclipse と CDT による C 言語での開発を前提にした。これにより、EOLUS を入手すれば、製造会社はシリアル通

信ポートを備えたパソコン以外の投資の必要無しで UECS 対応ノードの製品開発が可能になった。USE と EOLUS は、エヌアイシステムの林氏による精力的な開発成果である。

前述の通り、通信規格に Ethernet を使用したので、インターネット用の無線 LAN を設置すれば、園芸施設内でノートパソコン、PDA、携帯用ゲーム機などの無線 LAN 搭載の携帯情報機器を用いて、ノードの設定や遠隔操作が可能である(図4)。施設園芸生産者は2万円を切る価格の携帯用ゲーム機をポケットに入れて温室に行くだけで、すべての機器の状態をチェックすることができる。また、LAN がインターネットに接続されていれば、植物を観察しながら病虫害診断サイトに接続したり、資材の発注をしたりすることも可能になる。UECS を情報化のインフラとして整備すると、結果的に ICT 化施設園芸が容易に実現するのである。

UECS がオープン規格を採用した有用性が最も実感できたのは、ネットワーク規格について詳細な説明をしていないにもかかわらず、実証試験システムを導入した野菜茶業研究所の研究者が、UECS のパソコン用アプリケーションソフトウェアを容易に開発できてしまった点である。CCM の電文は XML であるので、通信パケットはテキストデータで可読性は高く、市販のネットワークアナライザだけで基礎的な実験が容易に行える。本規格の仕様書とインターネット用のネットワークプログラミングの入門書だけで、携帯電話でのトレンドグラフ表示、警報のメール送信、予測制御などのソフトウェアが続々と開発さ

表2 試作・製品化された UECS 対応機器の一覧(星, 2008)

ノードの種類	ノード開発組織	対象機器製造会社	開発レベル
暖房機ノード(重油)	ネボン		製品化可能
暖房機ノード(ガス)	エヌアイシステム	ネボン	試作
暖房機ノード		フルタ電機	
天窓ノード	誠和		製品化可能
カーテンノード	エヌアイシステム	日本オペレータ ミズホ	試作
側窓巻上ノード			
天窓ノード	エヌアイシステム	日本オペレータ ミズホ	試作
カーテンノード			
手動自動スイッチノード	エヌアイシステム		製品化可能
簡易コンソールノード	エヌアイシステム		
屋外気象ノード(温湿度・風向風速・日射量)	エヌアイシステム		
屋内気象ノード(温湿度・CO ₂ ・日射量)	エヌアイシステム		
屋内温湿度ノード(2種)	エヌアイシステム		
pH・EC計測ノード	エヌアイシステム		
データロガーノード	エヌアイシステム		
汎用入出力基板ノード(3種)	エヌアイシステム	各社	
人工光育苗装置ノード		各社	
くん煙ノード	東海大学	太洋興業 大信油化工業	
ファン一体型細霧冷房ノード	東海大学	フルタ電機・松下ナベック	
ベッド暖房ノード	エヌアイシステム	西電産業ほか	
給液機記録ノード		大塚化学	
養液供給ノード	東海大学	太洋興業	
養液栽培ベッドノード			
ベッド廃液計測ノード	エヌアイシステム		
CO ₂ 施肥ノード	エヌアイシステム	宮原酸素ほか	
補光ノード	東海大学	各社	
電照ノード	エヌアイシステム	各社	



図9 大規模イチゴ生産ハウスにおける UECS 室内気象ノードの設置状況((有)エヌアイシステム林氏提供)

れつつある(図5、図6)。図7は、図6のソフトを介して、携帯電話で温室の状態を遠隔監視している例である。このような開発事例から、UECS を施設園芸生産情報化のインフラとして整備すれば、施設園芸生産システムを資材調達、労務管理、出荷販売、経営管理、安全安心の各 ICT システムと連携させることも容易に実現可能になると考える

実用化・普及の展望

実用化から2年強が経過して、試作・製品化された UECS 対応機器の一覧を表2に示した。現時点で、約30種類の対応機器が開発されている。UECS 対応機器は、規格化された通信を行うので、製造会社が異なる機器を1棟の園芸施設に混在させることが可能である。生産者は、気に入った機器を自由に組み合わせ、環境制御システムを構築することができるようになった。

2008年2月に、長野県小諸市にある布引施設園芸組合の6,500m²の南ヶ原いちごハウスに UECS が導入された(図8)。生食用のイチゴ4種類をおよそ7万本栽培し、周年出荷を目指している。UECS 導入施設としては、初めての5,000m²超施設であり、大規模温室に適用できる技術としての真価が試されている。図9は、ハウス内部の UECS 室内気象ノードの設置状況である。現在のところ UECS は順調に稼働を開始している。

今後は、さらに多数の製造会社、試験研究機関の参画を期待している。UECS の技術に興味を持ち、施設園芸情報化における規格化の趣旨に賛同していただけるならば、業界、経験にかかわらず、また、個人・法人の別なく、参入は大歓迎で

ある。特に、UECS 対応アプリケーション開発に興味を持つ、ソフトウェア会社、団体等の参画を期待している。今後、施設園芸生産において最も重要なのは、植物生産、特に、生産効率改善のためのソフトウェアの開発と整備であると考えられている。実用化・普及のため、UECS の導入希望者、関連機器開発希望者を支援する目的で設立されたのが UECS 研究会 (<http://www.uecs.info/>)で、事務局は(有)エヌアイシステムである。また、(社)施設園芸協会(<http://www.jgha.com/>)と(独)農業・食品産業技術総合研究機構野菜茶業研究所が推進しているスーパーホルトプロジェクト(SHP)の総合システム部会においても、ソフトウェア開発の研究事業化などを通じて UECS の普及・活用の推進をサポートしていきたいと考えている。

参考文献

- 林 泰正, 星 岳彦, 高市益行, 山口浩明, 相原祐輔 (2004) 施設園芸におけるユビキタス環境制御システムの提案. 農業および園芸, 79(8): 845-853.
- 林 泰正 (2008) 環境制御の新展開-ユビキタス環境制御システム-, SHITA REPORT, 日本生物環境工学会植物工場部会, 25: 47-58.
- Hoshi, T., Hayashi, Y. and Uchino, H. (2004) Development of a decentralized, autonomous greenhouse environment control system in a ubiquitous computing and Internet environment, Proc. of 2004 AFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture, 490-495.
- 星 岳彦 (2005) 効率化・低コスト化を達成するユビキタス環境制御システム, 施設と園芸, 131: 22-26.
- 星 岳彦 (2006a) 施設園芸生産のためのユビキタス環境制御システム, 農林水産技術研究ジャーナル, 29(8): 15-19.
- 星 岳彦 (2006b) 自律分散型環境制御技術(ユビキタス環境制御)の現状, フレッシュフードシステム, 35(4): 13-17.
- 星 岳彦 (2007a) ユビキタス環境制御システムの開発, 農業機械学会誌, 69(1): 8-12.
- 星 岳彦 (2007b) 施設園芸情報化の鍵となるユビキタス環境制御システム, テクノイノベーション, 17(3): 29-34.
- 星 岳彦 (2007c) ユビキタス環境制御システム「ウエックス」、JA グリーンレポート, 460: 5-7.
- 星 岳彦 (2008) 温室環境制御のイノベーションを目指すユビキタス環境制御システム(上)(下), 農業電化, 61(6): 6-10, 61(7): 印刷中.
- 日経エレクトロニクス編集部編 (2008) エレクトロニクスで農業革命, 日経エレクトロニクス, 971: 43,69-70.