

コンシューマ・システム論文

# 施設園芸環境向け高信頼無線環境制御システムの検討と分析

井林 宏文<sup>1,a)</sup> 兼田 千雅<sup>1</sup> 李 鵬昆<sup>1</sup> 鈴木 雄也<sup>1,†1</sup> 今原 淳吾<sup>2</sup> 大石 直記<sup>2</sup> 黒田 正博<sup>3</sup>  
峰野 博史<sup>1</sup>

受付日 2014年12月21日, 採録日 2015年5月21日

**概要:** センサ技術の進歩によって様々な環境データが収集可能となっただけでなく, 収集した環境データを利用して各種機器を制御するシステムの開発もさかんに行われている. しかし確実なデータ送受信を望める有線を用いたセンサネットワークでは配線などの労力を必要とし, 一方, 無線を用いたセンサネットワークでは, 多数の障害物によって無線通信品質が低下し収集データの欠落が生じるという課題がある. また, 多数の電子機器類を過酷な現場環境下に設置すると熱暴走や結露によってシステムが停止するといった課題もある. 本研究では, 高温多湿な施設園芸環境でも栽培期間中の稼働率 99.99%以上を実現可能な高信頼無線環境制御システムの検討を行い, 2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線方式を用いた実証実験結果について報告する. 過酷な環境下での障害発生要因を整理し, 多重化や機能分散, 障害発生時の自動復旧といった機能を持つ高信頼無線制御システムを試作開発し, 静岡県農林技術研究所の施設園芸環境で実証実験を行った結果, 栽培期間中 100%の稼働率を達成できた. また, その間, 3.95%の packets 欠損が生じたが, 大半を占めていた 2.4 GHz 帯無線通信部分に関して詳細な要因分析を行い, 429 MHz 帯無線通信を用いて無線周波数を下げ波長を大きくすることで回避可能なことを確認した.

**キーワード:** センサネットワーク, 機器制御, 高信頼無線通信, 農業支援システム

## Study on Highly Reliable Wireless Environmental Control System for Horticulture Environment

HIROFUMI IBAYASHI<sup>1,a)</sup> YUKIMASA KANEDA<sup>1</sup> PENGKUN LI<sup>1</sup> YUYA SUZUKI<sup>1,†1</sup> JUNGO IMAHARA<sup>2</sup>  
NAOKI OISHI<sup>2</sup> MASAHIRO KURODA<sup>3</sup> HIROSHI MINENO<sup>1</sup>

Received: December 21, 2014, Accepted: May 21, 2015

**Abstract:** Recent advances in sensor technologies have been able to observe various environmental data and develop an agricultural environmental control system using these sensing data. However, wired sensor network system needs wiring cost, while wireless sensor network system has difficulty of high reliable operation due to obstruction. Moreover, the system should run stable under high temperature and humidity in horticulture environment. We propose a highly reliable wireless environmental control system for horticulture environment using 2.4 GHz wireless sensor network which can maintain high operating ratio and low packet error rate (PER) even though the system is under severe conditions. Experimental results showed the system operation rate was 100% during the culture period, although the 3.95% packet loss was occurred in 2.4 GHz wireless communication. Additional analysis revealed that tuning down the radio communication frequency to 429 MHz decreases the data loss by diffraction due to increase in wavelength.

**Keywords:** sensor network, actuator control, highly reliable wireless communication, agricultural system

<sup>1</sup> 静岡大学  
Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan  
<sup>2</sup> 静岡県農林技術研究所  
Shizuoka Prefectural Research Institute of Agriculture and Forestry, Iwata, Shizuoka 438-0803, Japan  
<sup>3</sup> 情報通信研究機構  
National Institute of Information and Communications Technology, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

### 1. はじめに

センサ技術の進歩によって様々な環境データが収集可能

<sup>†1</sup> 現在, ソフトバンク株式会社  
Presently with SoftBank Corp.  
a) ibayashi@minelab.jp

となっただけでなく、収集した環境データを利用して各種機器を制御するシステムの開発もさかに行われている。たとえば、農作物の栽培環境や農作物の状態に係るデータを収集し、生育環境や生育状況をグラフなどで可視化することで農業従事者に分かりやすい形で提供する農業向けモニタリングシステムがあり、大規模農場での実利用研究がさかである [1], [2]。

このような農業向けモニタリングシステムを構築する際、環境データの収集に有線センサを使用する場合、確実なデータ到達が保証されるものの、配線のコストが必要となるだけでなく、配線の有効長などによってセンサ設置場所に制約が生じるという課題がある。一方、無線センサネットワーク (WSN) を使用する場合、施設園芸環境のように金属パイプや成長した農作物といった様々な障害物の影響によって無線通信品質が低下し収集データの欠落が生じる可能性がある。また、高温多湿な施設園芸環境下にシステムを設置すると、電子機器の熱暴走や結露によって障害が生じ、数カ月単位の栽培期間継続して高信頼無線制御システムを運用し続けることは困難であった [3]。

本研究では、高温多湿な過酷な施設園芸環境でも栽培期間中の稼働率 99.99%以上を実現可能な高信頼無線環境制御システムの検討を行い、2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線方式を用いたプロトタイプシステムを開発し、静岡県農林技術研究所の施設園芸環境で実施中の実証実験状況について報告する。

## 2. 関連研究

農業環境下に様々なセンサを設置し、環境データを収集する研究開発がさかに行われつつある。国内では、UECS [4] 規格に基づく多種多様なセンサを利用したシステムがあり、計測データに基づいて環境制御を行う施設園芸 SaaS・施設環境制御 [5] が実用化されている。施設園芸 SaaS・施設環境制御では、UECS 規格準拠のセンサを任意に追加することができ、様々な環境データを収集可能としているが、UECS 規格のセンサと集約ノードは、有線を用いた通信が主流である。そのためデータの通信確実性は保証されるものの、センサの設置数やセンサ種類の増加に比例して配線などの設置コストが増大するため、膨大な数のセンサを設置する場合、農業従事者への負担が高いという課題があった。

一方、WSN を利用した農業環境のセンシングの研究 [6] も活性化しつつあり、WSN を用いた土壌水分のセンシング [7] や、土壌水分、土壌温度、気温などをセンシングして灌水制御を行う研究 [8] も行われている。特に施設園芸環境に WSN を設置する場合、金属配管や植物といった障害物だけでなく、センサノードの設置位置やアンテナ特性といった様々な要因が無線通信に影響を与え、受信電力低下によって収集データの欠落が生じる可能性が懸念される。

高信頼な WSN を利用してシステム稼働率 99.99%以上を目指す環境モニタリングシステムの研究 [9] も進められているが、今後は上り方向のセンシングだけでなく、下り方向のアクチュエータ制御も確実に高信頼な双方向無線制御システムが必要になっていくと考える。

農業環境の WSN では、2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4 準拠の無線通信 [10] を用いたものが一般的であるが、タイムスロットや周波数分割を導入し、パケット到達率の向上を図る研究 [11] や、パケット衝突回避やトラフィック分散機構と組合せた研究 [12] も行われている。しかし、シミュレーションでの評価が中心であり、気候や設置物、植生度合いによって無線通信環境が変化するような実環境での実証実験には至っていない。また、2.4 GHz 帯とは異なる周波数帯を用いる農業向け WSN として、433 MHz 帯を用いたジャガイモ畑でのセンシング研究 [13] があり、高湿度でも電波伝播が良くなる結果が得られている。日本では、医療用テレメータ向けの 429 MHz 帯が存在し、この周波数帯を利用した IEEE802.15.6 規格がある [14]。2.4 GHz 帯と比較して波長が長く障害物回折性に優れる 429 MHz 帯無線周波数を用いて、伝送スロット確保 (TDMA) や再送処理を行う機能を有しパケットロスの抑制が可能であるだけでなく 6 m 立方中に 10 個以上のセンサを同時運用が可能である IEEE 802.15.6 規格を採用すれば、障害物の多い施設園芸環境でも高信頼な WSN を構築可能であると考えられる。

## 3. 高信頼無線環境制御システム

### 3.1 要求仕様

施設園芸環境は温室など施設内で農作物を栽培可能な環境であり、同環境下には空調や窓開閉制御など多数のアクチュエータが存在する。これらアクチュエータを適切に制御することで、施設園芸環境を変化させ植物の生長をコントロールする環境制御システムを構築できるが、事前に設定された時刻で定期的なアクチュエータを制御するシステムが多い。施設園芸環境や植物の生育状態は時間経過とともに変化するため、時々刻々と変化するデータに基づいて適切な制御を行うことで高品質な植物を安定して生産できると考える。制御に対する時間要件は制御内容によって異なり、たとえば気温制御では厳格なリアルタイム制御は要求されないが、養分制御では厳格な制御が要求される。

想定システムは、センサノードで施設園芸環境や植物の生育状態などの情報をリアルタイムで収集し、制御情報にしたがってアクチュエータを制御する。センサノードは配線が不要な無線センサノードを利用することで、多数のセンサノードを設置した場合でも配線コストを抑制し設置容易性を高める。また、制御情報は収集した環境データをもとに利用者が判断しシステムに入力する。環境データの閲覧と制御情報の入力、利用者がネットワークに接続できればどこでも可能とする。

農作物を対象とした制御システムでは、夜間など利用者がシステム稼働状況をつねに監視できない場合でもシステムを継続して稼働させる必要がある。システムに障害が発生し正常な制御ができない場合は、農作物を適切に管理できず品質を低下させる恐れがあることから、想定システムは栽培期間中継続して稼働することが要求される。

以上、本研究で目指す高信頼無線環境制御システムに対する要求仕様を以下にまとめる。

- (1) 多数のセンサを用いて施設園芸環境内の環境データを収集し、収集した環境データはクラウドサーバに蓄積し、可視化インタフェースを通じて多数のユーザが任意の場所から閲覧可能であること
- (2) 現場環境の環境制御システムは、制御情報設定インタフェースを介してシステム利用者が任意の場所から設定変更でき、設定した制御情報に基づいて現場のアクチュエータ制御が行えること
- (3) 本システムを構成する電子機器や通信路に不具合が生じても自己復旧するなど、現場の環境制御に致命的な問題を生じさせないだけでなく、栽培期間において稼働率 99.99%以上を実現すること

IPA/SEC 重要インフラ情報システム信頼性研究会の報告書 [15] によると、利用者が限定され、センサノードやアクチュエータの増加に対応可能な拡張性を要するシステムでは、稼働率 99.99%以上が必要とされることから、本想定システムの目標稼働率も 99.99%以上と設定する。システム稼働率は次の式 (1) で示される。式 (1) のうち、システム停止時間はシステム利用者が定めた制御に対する時間要件を満たさない状況の時間を示す。

$$\text{稼働率} [\%] = \frac{\text{全時間} - \text{システム停止時間}}{\text{全時間}} \times 100 \quad (1)$$

2章で述べたように、現場導入の容易な WSN を用いて、上り方向のセンシングだけでなく、下り方向のアクチュエータ制御も確実に実行し、栽培期間において稼働率 99.99%以上を実現する施設園芸環境向け高信頼無線環境制御システムの実現を目指す。特に、植物の生育に必要な化学反応量は、反応場である施設園芸環境の気温によって変化するため、施設園芸環境の気温制御が植物の生育過程で重要な要素となる。そのため、本研究では施設園芸環境内の計測データに基づき、確実な温度制御を実現する高信頼無線環境制御システムの実現に焦点を絞る。図 1 に想定するシステムアーキテクチャを示す。

現場環境として想定する施設園芸環境は、気温 40 度以上、相対湿度 90%以上となる高温多湿な環境であり、使用する電子機器は耐高温多湿性を持つものが望ましく、屋外での使用が想定されない電子機器は、防水対策や熱対策を施す必要がある。また、図 1(1) データ収集部によって収集された環境データに基づいて、図 1(2) アクチュエータ制御部を介してアクチュエータをフィードバック制御する

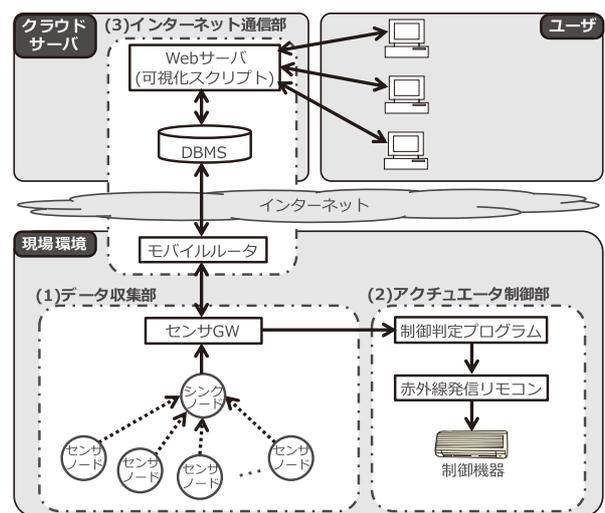


図 1 想定システムアーキテクチャ  
Fig. 1 System architecture.

ため、環境データが欠落するとアクチュエータを制御ができない。そのため、確実なアクチュエータ制御実現のために、WSN での無線通信部分だけでなく、収集データの処理部分において単位時間あたりの処理データ数増加に起因するバッファオーバーフローによって生じるデータ欠落を抑える必要がある。

一方、アクチュエータの制御情報は、収集した環境データなどに基づいてシステム利用者が設定することを想定している。これら環境データやアクチュエータ制御情報をクラウドサーバで管理することで、インターネットに接続可能な環境下のユーザが任意の場所から環境データの閲覧や制御情報の変更が可能となり、システム利用者の利便性が向上する。しかし、図 1(3) インターネット接続部を介したクラウド型システムの場合、現場環境をインターネットに接続するモバイルルータやクラウドサーバに障害が生じた際に、下り方向の制御信号が現場環境へ到達せず、現場環境の制御が不能になってしまう。また、環境データや制御情報を蓄積するクラウドサーバ側のデータベース (DBMS) のみで環境データを蓄積する場合、現場環境から DBMS までの上り通信路上で障害が生じるとデータの欠落が生じ、適切な制御信号を発行できなくなる。そのため、高信頼な現場の環境制御を実現するためには、現場環境にもローカルバックアップ用のストレージを用意するなど、上り下り方向の通信路やクラウドサーバに障害が生じて、データが欠落しないようにするだけでなく、最新の制御情報でなくても利用者が定めた最低限の現場アクチュエータ制御を実行し、現場の環境制御に致命的な問題が生じないようにする必要がある。

### 3.2 環境データ収集部

要求仕様 (1) に対し、環境データを収集するセンサノード、環境データを処理するセンサゲートウェイ (GW) プロ

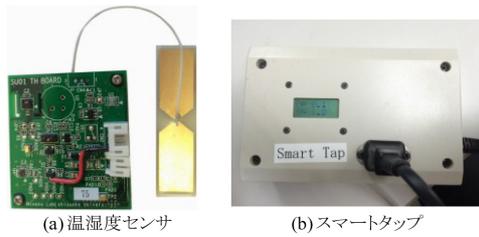


図 2 2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線センサノード  
 Fig. 2 2.4 GHz IEEE 802.15.4-2006 wireless sensor nodes.

グラム, DBMS を用いて環境データ収集部を実現する. 本システムは, アクチュエータ制御による施設園芸環境内の気温制御に焦点を絞っており, 気温, 相対湿度の計測, およびアクチュエータ動作確認用の消費電力の収集可能なセンサを使用する. 環境データを収集するセンサノードとして, 文科省地域イノベーションクラスタープログラム「自立分散協調ユビキタスセンサネットワーク (2007-2011)」[16]で実用化した 2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線通信を用いた温湿度センサノード (図 2(a)), 消費電力を計測するスマートタップ (図 2(b)) を使用する.

図 2(a) の温湿度センサノードは, センサ基板上のディップスイッチを切り替えることで, センサデータを集約するシンクノードとして動作させられる. また, 前述の 429 MHz 帯 IEEE 802.15.6 方式を用いた無線モジュールと差し替えることで, 2.4 GHz 帯と比較して波長が長く障害物解析性に優れる特性の検証も可能であるが, 今回の実証実験では, 組み込み可能な無線モジュール数の制約のため, まずは 2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線センサノードを採用した.

シンクノードで集約された各環境データは, 任意の場所からアクセス可能とするため, クラウドサーバ側に設置する DBMS で蓄積する. この際, シンクノードから直接 DBMS へ環境データを登録するよう実装できるが, 各センサノードからのデータ集約と DBMS への登録の両方を同時に実施するのでは, シンクノードの処理負荷が高くなるだけでなく, 不具合発生個所の特定に難航する恐れがある. 不具合箇所が特定できることで, 不具合に応じた適切な復旧機能を実装可能となるため, Linux カーネルを搭載するマイクロサーバへ UART シリアル通信によってシンクノードを接続し, DBMS への登録はマイクロサーバ内で稼働させるセンサ GW プログラムが実施するようにする. このセンサ GW プログラムでは, シンクノードからの環境データに対してデータフォーマット解析を行い, 取り出せた環境データをクラウドサーバ上の DBMS へ登録する.

DBMS へ蓄積された環境データは, 図 3 に示す可視化インタフェースを介して Web ブラウザで閲覧可能で, インターネットへ接続可能な環境であればデータを確認できる.

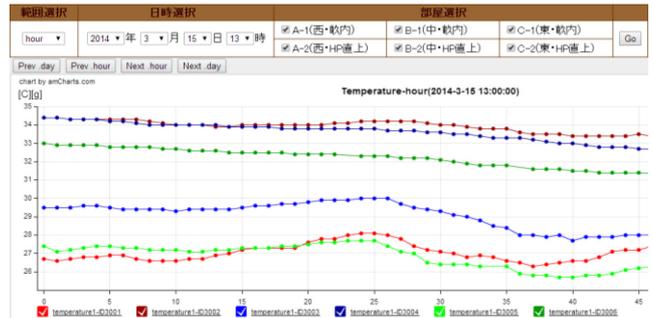


図 3 可視化インタフェース  
 Fig. 3 Visualization interface.

部屋	制御番号	月日設定	時間設定	温度	湿度	冷感度
A-1(西)	0	START 2014年2月15日 8時0分	STOP 2014年2月16日 15時0分	30	0	暖房
A-1(西)	1					暖房
A-1(西)	2					暖房
B-1(中央)	0	START 2014年2月15日 09時00分	STOP 2014年2月16日 12時00分	20	0	暖房
B-1(中央)	1					暖房
B-1(中央)	2					暖房
C-1(東)	0	START 2014年2月15日 08時00分	STOP 2014年2月16日 12時00分	25	0	冷房
C-1(東)	1					冷房
C-1(東)	2					冷房

図 4 制御情報設定インタフェース  
 Fig. 4 Actuator control interface.

### 3.3 アクチュエータ制御部

要求仕様 (2) に対し, 図 4 に示す制御情報設定インタフェースを介してシステム利用者が任意の場所からクラウドサーバ側の DBMS へ制御情報を登録したり設定を変更したりできるようにする. 現場環境のマイクロサーバ上で制御判定プログラムを動作させ, クラウド上の DBMS へ登録された最新の制御情報を取得し, 環境データと制御情報からアクチュエータの制御判定を行ってマイクロサーバと同一サブネット上に存在する赤外線信号を発信可能なリモコン iRemocon (GLAMO 製, IRM-01L) を用いて, 赤外線制御可能なアクチュエータを制御する. iRemocon は TCP 通信のサーバ機能を有するため, 制御判定プログラムが TCP 通信クライアントとして iRemocon と接続し, 制御命令を送信することで赤外線信号の発信が可能となる.

### 3.4 耐障害性向上と障害時自動復旧機能

現場の環境制御に致命的な問題を生じさせないだけでなく, 栽培期間において稼働率 99.99%以上を実現するという要求仕様 (3) を満たすために, 現場環境に設置する機器は防水対策や熱対策を施す必要がある. センサノードは散水や薬剤散布作業で液体が付着することが想定されるため, ケースに入れるなどでセンサノードを液体類から保護する. 現場環境でプログラムを稼働させるマイクロサーバとして, 気温 55 度までの動作保証のある OpenBlocks A7 (ぶらっとホーム製, OBSA7P/J7) を採用する (図 5). さらに, センサ GW プログラムや制御判定プログラムは, 実

行可能形式で稼働させるだけでなく、システム稼働に不要な他プロセスを最低限とし、CPU やメモリ使用量を軽減し、熱暴走発生や故障リスクを抑制する。

また、インターネット通信部として、人口カバー率100%を実現済みの3G 携帯回線網で接続可能なSIM カードとモバイルルータを使用する。これにより、本システムは携帯回線網の提供エリアに設置可能なM2M システムとなる。ここで、携帯回線網を用いたインターネット接続は、常時接続を想定していないため、異なる通信キャリアの提供する3G 携帯回線網へ接続するマルチホーム構成を採用する。さらに、モバイルルータ自体の障害でインターネットに接続できない状況も想定されるため、iBoot (dataprobe 製) を介してモバイルルータの電源をとる構成とする。iBoot は、接続された電子機器へ周期的に ping を送信し、応答がない場合に接続された電子機器への供給電力を On/Off できるネットワーク対応電源スイッチである。この仕組みを利用することで、モバイルルータに不具合が生じインターネットから切断された場合は、モバイルルータを再起動させることでインターネット接続の自動復旧を実現する。

次に、インターネットから切断された現場環境を考える。収集した環境データをDBMS へ登録する上り方向の通信が不能となるため、その間の環境データ欠落を抑えるためにローカルストレージをマイクロサーバ上へ用意する。ローカルストレージは、インターネット接続を自動復旧するための一時的データ蓄積ができればよいため、クラウド上に設置する PostgreSQL と同様なリレーショナルデータベースであるが、サーバ機能を保持せず1MB 未満のライブラリで動作可能な SQLite を利用する。インターネットから不意に切断された場合でもローカルストレージにデータが蓄積されるため、自動復旧後にクラウドサーバ側のDBMS へデータ登録可能となり、タイムラグが生じるもののデータ欠損を抑える。一方、インターネットから切断時の下り方向通信に関して考える。アクチュエータの制御判定に使用する制御情報はクラウドサーバ側のDBMS から取得するが、インターネット接続が切断時でも現場環境の環境制

御を実現するために、アクチュエータ制御判定プログラムは直近の制御情報を保持するようにする。最新の制御情報が取得できない場合は保持された直近の制御情報を使用してアクチュエータ制御を行う。先述の iBoot を導入することでインターネット接続からの自動復旧を実現でき、かつ制御情報の更新は低頻度であることから、本システムでは一時的に直近の制御情報を使用した制御を行う。

## 4. 施設園芸環境での実証実験

### 4.1 実験概要

施設園芸向け高信頼無線環境制御システムを開発し、実証実験を実施した。本実験では、稼働期間中にシステム利用者が設定した制御値に応じた機器制御が正確に行われるか検証した。実験期間は2014年3月4日～2014年6月3日で、うち2014年3月8日～2014年3月25日は、表1に示す時間帯でスポット冷暖エアコンを稼働させ、施設園芸環境内の温度制御を行った。表1の制御設定温度を下回る場合は、暖房設定によってスポット冷暖エアコンを暖房稼働させ、制御設定温度を上回る場合は、スポット冷暖エアコンを冷房稼働させるよう設定した。

本実証実験での稼働率は式(1)を用いて算出するが、式(1)中のシステム停止時間を決定するシステムの時間的要件は、システム利用者である農業従事者との打ち合わせによって決定した。気温制御では厳格なりアルタイム制御は要求されないことから、本実証実験での稼働率は、10分以内の制御実行反映を正常稼働と定義することとした。

### 4.2 実験環境

静岡県農林技術研究所の温室(南北方向約25m×東西方向約19m)内をポリオレフィンフィルムで小温室3つに区切り、西側から順に小温室A、小温室B、小温室Cとし、3つの小温室それぞれにセンサ類と、制御機器としてスポット冷暖エアコン(TOYOTOMI 製, TAD-28JW)を設置した。1つの小温室に対して、温湿度センサ2個、スマートタップ1個を設置し、制御機器1台で暖房機能と冷房機能を利用した。図6に小温室内に設置した温湿度センサノード、スマートタップ、スポット冷暖エアコンの配置図を、図7に現場環境の様子を示す。

農業従事者の要望から、温湿度センサは小温室中央部の

表1 施設園芸環境内温度制御実験情報

Table 1 The information of temperature control experiment.

制御期間	制御設定温度		
	小温室 A	小温室 B	小温室 C
17:00～23:00	暖房 28℃	冷房 24℃	冷房 20℃
23:00～1:00	暖房 20℃	暖房 20℃	冷房 20℃
1:00～8:00	暖房 20℃	暖房 20℃	暖房 20℃

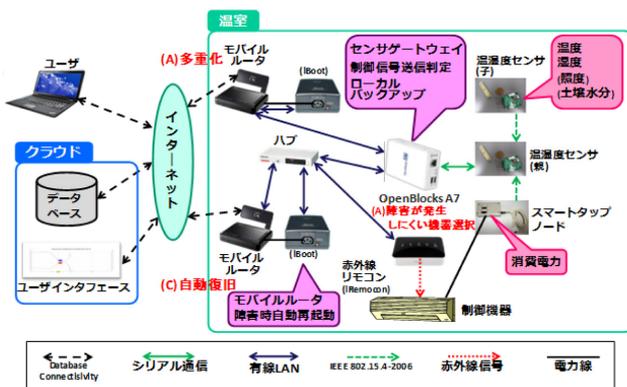


図5 耐障害性向上と障害時自動復旧機能

Fig. 5 Fault-tolerance improvement and automatic recovery.

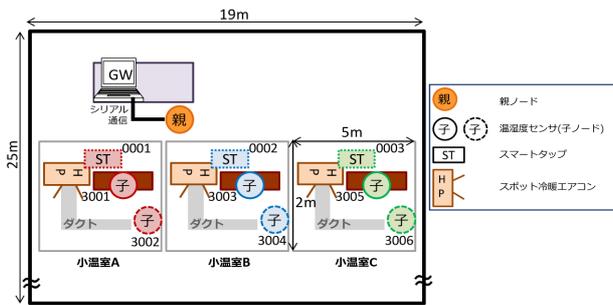


図 6 施設園芸環境内のセンサノード類配置図  
Fig. 6 Layout of sensor nodes in horticulture.



図 7 現場環境の様子  
Fig. 7 State of the environmental field.

植物の畝内部（地上高 1.3m）と、スポット冷暖エアコンのダクト終端（地上高 0.2m）に 1 個ずつ設置した。植物の畝内部に設置したセンサは、スポット冷暖エアコンの制御判定に使用し、スポット冷暖エアコンのダクト終端に設置したセンサは、冷温風の出力確認に使用した。スポット冷暖エアコンにも温度センサが搭載されているが、制御判定に使用する気温は植物畝内部の気温を基準とするため、スポット冷暖エアコンではなく温湿度センサを利用する。なお、直射日光や農薬から温湿度センサを守るため、温湿度センサノードは小型ラジエーションシールド内へ入れ設置した。

また、スマートタップをスポット冷暖エアコンの電源部に接続し、スマートタップで計測されるスポット冷暖エアコンの消費電力を用いて、スポット冷暖エアコンの On/Off 制御が反映されたかどうか判断し、制御が反映されない場合は、制御信号の再送を行うようにした。

センサ GW を稼働させる OpenBlocks A7 は、モバイルルータ、iBoot、スイッチングハブと一緒に小温室 B の北側に設置したプラ製ケースに格納した。モバイルルータおよびスイッチングハブは、屋外での使用が想定されていない機器であるため、プラ製ケースに入れて灌水時の水や農薬などの液体が直接機器にかからないようにした。さらに、スポット冷暖エアコンの赤外線リモコン受光部に iRemocon の赤外線信号発光部を設置したが、iRemocon も屋外での使用を想定した機器ではないため、簡易的にタッパーに入れて灌水や農薬などが直接機器にかからないようにした。

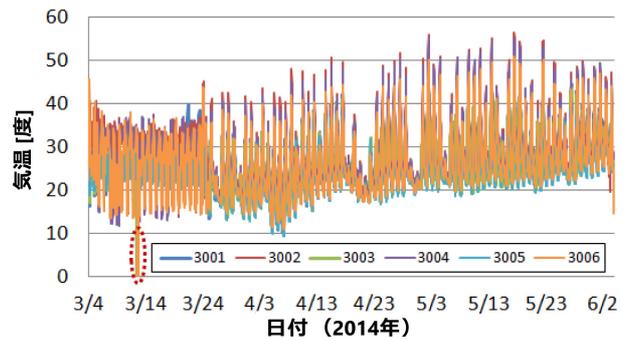


図 8 温度制御実験結果 (3/4~6/3)  
Fig. 8 The result of temperature control experiment.

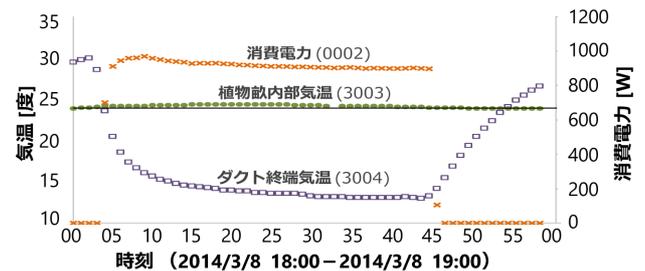


図 9 温度制御実験結果 (3/8 18:00-19:00)  
Fig. 9 The detail of temperature control experimental result.

#### 4.3 稼働率の検証

図 8 に、実験期間である 2014 年 3 月 4 日~2014 年 6 月 3 日の温湿度センサで収集した環境データの推移を示す。温室内はスポット冷暖エアコンによる温度制御のほか、温水暖房による加温がなされており、深夜での最低気温は 10 度より高い。3 月 14 日で温度が 0 度となっている点があるが、温室の電気設備点検にともなう停電によって現場システムが停止したことが原因であり、稼働率の計算から除外する。制御設定値に基づいたスポット冷暖エアコン制御が正常に実施されていたことを検証するために、2014 年 3 月 8 日 18 時台の小温室 B (温湿度センサ ID : 3003, 3004, スマートタップ ID : 0002) の収集データを抜粋したものを図 9 に示す。表 1 から同時間帯は冷房 24°C の設定としていたため、24°C を図 9 中に実線で示した。この 24°C 設定を植物畝内部気温 (ID : 3003) が上回った 18:05 ごろ、消費電力 (ID : 0002) が上昇し、スポット冷暖エアコンの電源が On になったことが分かる。また、ダクト終端気温 (ID : 3004) が低下したことで、冷風が送出されたことが確認できる。その後、18:45 ごろに、植物畝内部気温が制御設定の 24°C を下回ったため、スポット冷暖エアコンの電源が Off となり消費電力が低下している。その後、ダクト終端気温が徐々に上昇していることからスポット冷暖エアコンの冷風送出が停止したことが分かる。つまり、制御条件を満たしてから 10 分以内にスポット冷暖エアコンの電源が入り、また制御条件を満たさなくなってから 10 分以内にスポット冷暖エアコンが停止しており、前述の正

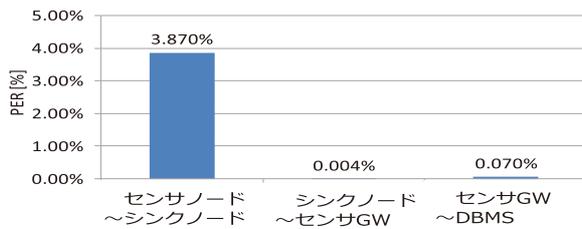


図 10 通信路中のパケット欠損率

Fig. 10 The packet loss rate in each channel.

常稼働の条件を満たしていることが分かる。図 8 中赤枠の電気設備点検時の停電を除き、本システムは実証実験期間中不具合なく稼働し続け、温室内温度制御もシステム利用者の要求を満たす 10 分以内の制御反映を実現したことから、稼働期間中のシステム稼働率 100%であったといえる。

#### 4.4 パケット欠損率の分析

次に、クラウド上 DBMS へ登録されるまでの通信路中で失われたパケット欠損率の分析を実施した。センサノード、シンクノード、センサ GW プログラムにてそれぞれ独立したシーケンス番号を付加することで、DBMS へ登録されなかったデータが通信路中のどこで失われたか分析した。収集したデータのクラウドサーバ側 DBMS でのパケット欠損率 (PER) は、本実証実験期間 90 日で平均 3.95% であり、全収集データ 1,528,818 個のうち 62,820 個のデータが欠損していた。本環境制御システムは、収集した環境データに基づいてアクチュエータ制御を行うフィードバックシステムであるため、前述の稼働率定義では稼働率 100%を達成したが、データ欠損が多発することは望ましくない。

図 10 に通信路中でシーケンス番号の抜けが生じた個所のパケット欠損率を示す。パケット欠損は、センサノードとシンクノード間で 61,688 個 (パケット欠損率 3.87%) と最も高かった。シンクノードからセンサ GW 間でも 62 個 (パケット欠損率 0.004%)、センサ GW からクラウドサーバ側 DBMS 間でも 1,070 個 (パケット欠損率 0.07%) の欠損が確認できた。

センサノードとシンクノード間の欠損は、2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線通信区間でのパケット欠損と考えられる。シンクノードとセンサ GW 間の欠損は、シンクノードでの受信パケットが破損していた場合に、センサ GW プログラムのデータフォーマット判定部にて不正なデータと処理され破棄されたことが原因である。また、センサ GW とクラウドサーバ側 DBMS 間での欠損は、クラウドサーバ側 DBMS が一時的にビジー状態となった際に環境データの正常登録が実行できず、ビジー状態から復帰後に次のデータから登録される仕様で実装していたため、正常登録できなかったデータが消失していたことが判明した。そのため、センサ GW プログラムに待機バッファを設け、クラウド上 DBMS がビジー状態になり正常にデー

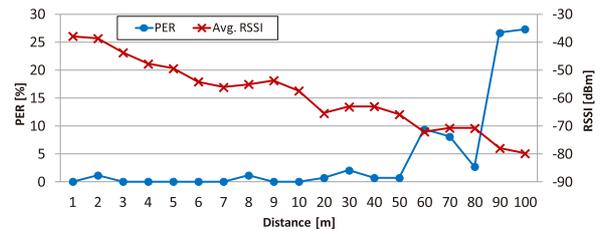


図 11 見通し区間での PER および RSSI (2.4 GHz)

Fig. 11 The PER and RSSI at the line of sight (2.4 GHz).

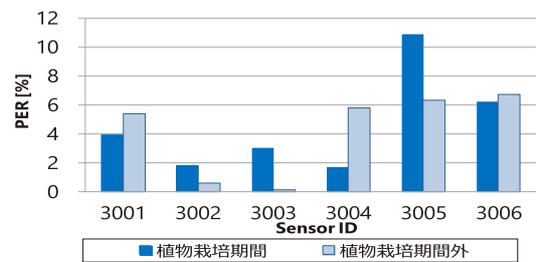


図 12 施設園芸環境に設置したセンサの PER (2.4 GHz)

Fig. 12 The PER in horticulture (2.4 GHz).

タの登録ができなかった場合でも再度登録動作を実行できるように改良した。図 5 のシステムを利用して待機バッファの効果を検証したところ、センサ GW とクラウドサーバ側 DBMS 間での欠損は 233,488 個のデータに対して 3 個であり、PER は 0.0013% となった。したがって、待機バッファを設けたことでクラウドサーバ側 DBMS がビジー状態となった場合のデータ消失抑制が可能であることを示すことができた。

#### 4.5 2.4 GHz 帯 IEEE802.15.4-2006 パケット欠損の分析

センサノードとシンクノード間の 2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線通信区間での欠損について詳細分析した。欠損要因の 1 つに、植物体や金属配管など温室内の障害物による無線通信品質の低下が考えられる。図 11 に、図 2 (a) の温湿度センサを障害物のない屋外空間 (運動場) に設置して、送受信ノードを 1m~100m 離して RSSI の距離減衰と PER の関係を計測した結果を示す。距離増加につれ RSSI が減少し、RSSI が約 -70 [dBm] を下回ると PER が 10% 程度以上に上昇していくことが分かる。

一方、本実証実験で施設園芸環境に設置した各温湿度センサの PER に関して、植物栽培期間と植物栽培期間外で比較したグラフを図 12 に示す。図 11 と図 12 を比較すると、見通し区間に設置した場合よりも施設園芸環境に設置した場合の方が、全体的に PER が高かったことが分かるだけでなく、図 12 から各温湿度センサの PER は、植物の有無によって異なる傾向を示していることが分かる。特に小温室 C の植物畝中に設置している 3005 番のセンサノードは、シンクノードとの距離が約 7.32 m と短いにもかかわらず

らず、植物栽培期間中は PER が 10% を超えており、植物栽培期間外では約 6% の PER であった。つまり、施設園芸環境下に存在する植物や金属配管などが無線通信に対して障害物となり、RSSI の低下やそれにとまなうパケット欠損が生じたのではないかと考えることができる。

## 5. パケット欠損率増加要因の詳細分析

### 5.1 水分の影響について

現場施設園芸環境で生じた植物栽培期間中の PER 増加の要因として、植物体に含まれる水分の影響が考えられる。本実験で使用した植物は水分含有率が約 89% と高く、葉や果実中に多くの水分を有している。2.4 GHz 帯無線通信における水の比誘電率は約 80 であり [17]、これは水が 2.4 GHz 帯無線電波の吸収率が高いことを示している。そのため、植物体に含まれる水分に電波が吸収され、結果的にシンクノードでの受信電力が低下し PER が増加した可能性がある。また、本実証実験では温室内の小温室を区別する際、ポリオレフィン製フィルムを使用しており、小温室内のスポット冷暖エアコンによる温度制御によって、小温室内外で温度差が生じている。その結果、ポリオレフィン製フィルム表面に結露が生じ、この結露による電波吸収によって RSSI が低下し、PER が増加した可能性も考えられる。

そのため、学内の電波暗室（長辺 9.6 m × 短辺 3.3 m）内で、図 2 に示した 2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線センサノード、比較用として 2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4e-TSCH 無線センサノード、429 MHz 帯 IEEE 802.15.6 方式無線モジュールを接続した無線センサノードのパケット到達率を計測した。各ノードは、地表面からの電波反射の影響を考慮しいずれも地上から高さ 1.2 m に設置し、シンクノードとの距離は伝搬減衰の影響を考慮して図 11 の計測時の最短距離と同じ 1 m とした。センサノードとシンクノード間は施設園芸環境を模擬し、障害物なし、(a) ポリオレフィン製フィルムあり、(b) 結露を模擬してフィルムに霧吹きで水滴あり、(c) 植物体を模して人間（約 60% 水分）を伝搬路中に配置の 4 種類の環境を用意した。図 13 に示す結果から、ポリオレフィン製フィルムの影響はほとんどない

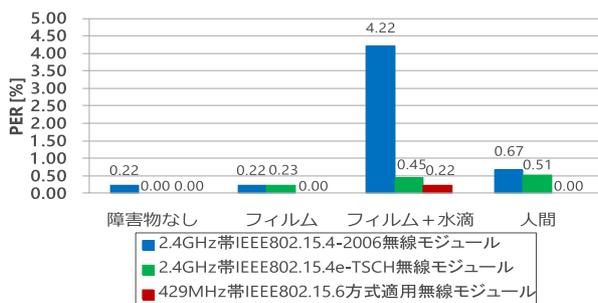


図 13 フィルムや水分の影響

Fig. 13 The influence of film and moisture.

が、水滴や人間による PER の上昇は、2.4 GHz 帯無線通信で約 1~数%生じる可能性を確認できた。

### 5.2 アンテナ揺れの影響について

前述の水分の影響のほか、植物栽培期間中の PER 増加の要因を分析するため、温室内の環境要因と RSSI やパケットロス数との相関関係を詳細分析した。2014/3/17~3/23 までの温室内の温度、相対湿度、温度制御実施時間帯、各センサノードの RSSI、1 時間あたりのパケットエラー数の変化を分析し、特にノード ID: 3001 の推移を図 14 に示す。図 14 上部には、外気情報として気象庁が公開する気象データを可視化する Weather Spark の提供するホームページのデータを利用し、同期間中の磐田市の気温、湿度、気圧、風向の計測値を追記している。図 14 で網掛けで示された時間帯は、表 1 に示した温室環境制御の実施された 17 時~翌 8 時であり、同時間帯での RSSI 変動およびパケットロス数の増加が見られる。また、2014/3/21 は、日中の環境制御していない期間でも RSSI が大きく変動し、パケットロス数が増加している。ここで考えられる要因は、温室環境制御中はスポット冷暖エアコンからの送風が発生していること、また Weather Spark のデータから磐田市では 2014/3/21 12 時に風速 9.2 m と強い風（春の嵐）であったことが分かった。本実験で設置した温湿度センサノードは、温湿度の計測を植物体周辺で実施するため、紐で吊り下げる形で設置しており、スポット冷暖エアコンからの強い送風で植物体や温湿度センサノード自体が揺れ動いていた可能性があった。また、温室の天窓は通常昼間は排熱のために解放され、2014/3/21 の屋外の強風が温室にも流れ込み、植物体や温湿度センサノード自体が揺れ動く可能性もある。温湿度センサノードや接続アンテナが数 cm 程度動いていた可能性があり、その影響で RSSI が大きく変動しパケットロス率の上昇につながっている可能性が考えられた。

そこで、風でアンテナが揺れることによって RSSI および

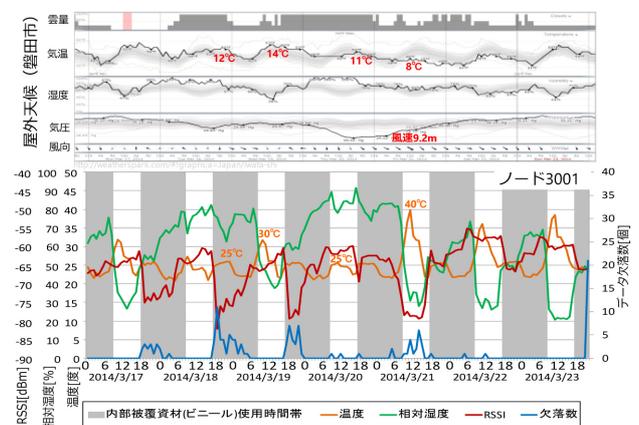


図 14 各種環境データと RSSI, PER の推移

Fig. 14 The transition of environmental data, RSSI and PER.

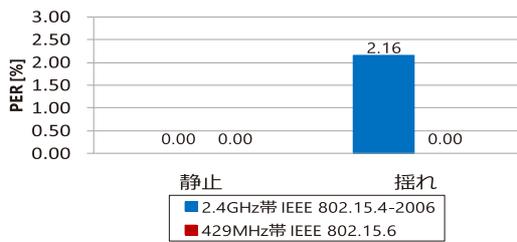


図 15 アンテナ揺れによる PER 変化

Fig. 15 The PER variation caused by shaking of antenna.

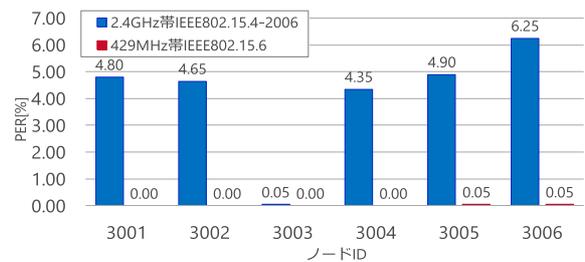


図 17 2.4 GHz 帯と 429 MHz 無線モジュールの PER

Fig. 17 The PER in horticulture (2.4 GHz and 429 MHz).

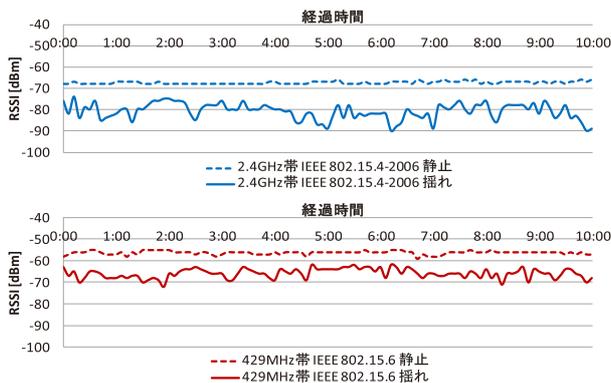


図 16 アンテナ揺れによる RSSI 変動の推移

Fig. 16 The RSSI transition caused by shaking of antenna.

PER にどの程度の影響を与えるか分析する実験を実施した。実験は、図 2 に示した 2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線センサノード、比較用として同じく送信電力 10 mW の 429 MHz 帯 IEEE 802.15.6 方式の無線モジュールを搭載したセンサノードとそれぞれのシンクノードを用いて、前述の電波暗室にて実施した。ノードは地表面からの電波反射の影響を考慮し、いずれも地上から高さ 1.2 m、シンクノードとの距離は距離による伝搬減衰の影響を考慮して図 11 の計測時の最短距離と同じ 1 m とした。各無線センサノードを竹籠でぶら下げ、扇風機と木の棒を用いて実験中揺らし続ける実験を実施した。なお、RSSI は受信側無線モジュールのチップ性能やアンテナ感度に依存するため、異なる仕様の無線モジュール間の単純な比較はできない。そのため、同一の無線モジュール間における RSSI 変動の推移で分析することとした。

アンテナを揺らした場合の PER と RSSI 変動の推移を、それぞれ図 15、図 16 に示す。図 15 より、2.4 GHz 帯 IEEE802.15.4-2006 方式は、アンテナを揺らし続けた場合にパケットエラーが発生している一方、429 MHz 帯 IEEE 802.15.6 方式を採用する無線モジュールではいずれの場合もパケットエラーは発生していない。また、図 16 の RSSI 変動の推移を比較すると、2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 方式ではアンテナを揺らした場合の RSSI 変動幅が大きいことが分かる。これは波長の長さが影響しているものと考えられる。シンクノードで受信される電波は、センサノードからの直接波と他物体で反射する間接波との合成波であ

り、合成波の信号強度は直接波と間接波の位相差によって決定される。直接波と間接波の位相差が 0 の場合、合成波の信号強度は直接波の 2 倍となるが、位相差が 1/2 波長の場合は合成波の信号強度が 0 となってしまう。そのため、波長約 12.5 cm の 2.4 GHz 帯無線通信では、位相差が 1/2 波長である 6.25 cm 変動するだけで信号強度が 0~2 倍と大きく変動し、アンテナが数 cm 揺れただけでも影響を受けやすい。一方、429 MHz 帯無線通信の波長は約 69.9 cm であるため、アンテナが数 cm 揺れても影響を受け難かったと考える。

### 5.3 429 MHz 帯無線通信の適用について

5.1 節および 5.2 節の分析結果から、施設園芸環境下での 429 MHz 帯無線通信の適用効果を検証する。電波暗室での実験結果から、429 MHz 帯無線通信は 2.4 GHz 帯無線通信と比較してフィルムや水分、アンテナの影響を受けにくいことから、429 MHz 帯無線通信の適用でパケット欠損抑制を期待できる。

2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線センサノードと 429 MHz 帯 IEEE 802.15.6 方式の無線モジュールを搭載したセンサノードとそれぞれのシンクノードを施設園芸環境内にそれぞれ設置し、パケット欠損の比較実験を実施した。両センサノードは 5.1 節および 5.2 節で使用したセンサノードであり、またセンサノードは図 6 中の温湿度センサ (3001~3006) と同一位置に設置した。2.4 GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 無線センサノードと 429 MHz 帯 IEEE 802.15.6 方式の無線モジュールを搭載したセンサノードの PER を図 17 に示す。2.4 GHz 帯 IEEE802.15.4-2006 方式はシンクノードに最も近い 3003 番のセンサノードを除いて約 4%~6% の PER を示している。一方、429 MHz 帯 IEEE 802.15.6 方式は最大でも 0.05% であり、実際の施設園芸環境でも 429 MHz 帯無線通信の適用でパケット欠損を抑制可能であることが確認できた。

以上の分析結果から、現場施設園芸環境で温度制御時間帯や強風時に PER が上昇したのは、風によってアンテナが揺れ、RSSI が大きく変動し、その結果無線モジュールでの受信感度下限を下回ったことが主要因であったと考える。

## 6. おわりに

本研究では、過酷な施設園芸環境下でも稼働率 99.99%以上を実現可能な高信頼無線環境制御システムの検討を行い、2.4GHz 帯 IEEE 802.15.4-2006 方式を用いたプロトタイプシステムで実証した。その結果、2.4GHz 帯無線通信は 1/2 波長が約 6.25 cm であるため、数 cm のアンテナ揺れによって RSSI が大きく変動し、PER が上昇することを確認した。一方、1/2 波長が約 35 cm と長い 429 MHz 帯では送風などによってアンテナ揺れが生じてても RSSI 変動が 2.4GHz 無線通信程大きくなく、障害物などの回折性も高いため施設園芸環境での使用に効果がある可能性が示された。

今後、429 MHz 帯無線モジュールを使用した無線制御システムを施設園芸環境で稼働させ、実環境でのシステム稼働率の評価を行う。また、予測制御などとの連携による知的アクチュエータ制御システムの実用化を目指す。

**謝辞** 本研究は、SCOPE 地域 ICT 振興型研究開発「高度農業 ICT を実現する高信頼双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークの研究開発 (H25~26)」により実施したものである。

## 参考文献

- [1] Matese, A. et al.: A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.69, pp.51-58 (2009).
- [2] Pierce, F.J. et al.: Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.61, pp.32-43 (2008).
- [3] 小林悠一, 他: センサネットワークを用いた温湿度制御システムの研究, MBL 通信研究会研究報告 24, pp.1-8 (2013).
- [4] 星 岳彦: 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, *農業情報研究*, Vol.17, No.1, pp.13-18 (2008).
- [5] FUJITSU Intelligent Society Solution 食・農クラウド Akisai 施設園芸 SaaS・施設環境制御 box, 入手先 (<http://jp.fujitsu.com/solutions/cloud/agri/uecs/>) (参照 2014-04-30).
- [6] Camilli, A. et al.: From wireless sensors to field mapping: Anatomy of an application for precision agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.58, No.1, pp.25-36 (2007).
- [7] Huang, J. et al.: Development of a wireless soil sensor network, *Proc. ASABE annual meeting 2008* (2008).
- [8] Vellidis, G. et al.: A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation, *Computers and electronics in agriculture*, Vol.61, No.1, pp.44-50 (2008).
- [9] Doherty, L. et al.: Towards 100% Reliability in Wireless Monitoring Networks, *ACM PE-WASUN*, pp.132-135 (2006).
- [10] Zhen, B. et al.: TG6 Technical Requirements Document (TRD), *IEEE P802.15.08-0644-08-0006* (2008).
- [11] Watteyne, T. et al.: OpenWSN: a standards-based low-power wireless development environment, *Trans. Emerg-*

*ing Telecommunications Technologies*, Vol.23, No.5, pp.480-493 (2012).

- [12] Kim, Y.-D. et al.: RMRP: A Reliable MAC and Routing Protocol for Congestion IEEE 802.15.4 Based Wireless Sensor Networks, *IEICE Trans. Communications*, Vol.E96-B, No.12, pp.2998-3006 (2013).
- [13] Thelen, J. et al.: Radio wave propagation in potato fields, *1st Workshop on Wireless Network Measurements*, Vol.2 (2005).
- [14] IEEE Std. 802.15.6-2012, *Wireless body area networks* (2012).
- [15] IPA/SEC 重要インフラ情報システム信頼性研究会報告書, 入手先 (<http://www.ipa.go.jp/files/000004741.pdf>) (参照 2014-05-02).
- [16] 松野智明, 他: 観測データの空間補間を利用した施設園芸環境の可視化・制御システムの提案, DICOM2012 シンポジウム, pp.2129-2136 (2012).
- [17] Hippel, A.R. et al.: *Dielectrics and waves* (1954).



井林 宏文 (学生会員)

2014 年静岡大学情報学部卒業。同年静岡大学大学院情報学研究所進学。高信頼無線センサネットワークシステム、農業支援システムに関する研究に従事。



兼田 千雅 (学生会員)

2015 年静岡大学情報学部卒業。同年静岡大学大学院総合科学技術研究所進学。センサデータマイニング、知的農業支援システムに関する研究に従事。



李 鵬昆

2012 年桂林電子科学技術大学情報科学技術学院卒業。2014 年 4 月静岡大学大学院情報学研究所進学。無線チャネルスキャン、農業支援システムに関する研究に従事。



鈴木 雄也

2015 年静岡大学大学院情報学研究所修士課程修了。同年ソフトバンク入社。センサネットワーク、センサデータマイニング、農業支援システムに関する研究に従事。



**今原 淳吾**

2003年静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年静岡県入庁。現在は静岡県農林技術研究所勤務。温室メロン、トマトの栽培研究に従事。



**大石 直記**

1987年東京農工大学農学研究科修士課程修了。同年静岡県農業試験場入社。静岡県庁を経て、2002年より静岡県農業試験場、現静岡県農林技術研究所勤務。トマト栽培における夏季高温対策、高度環境制御の研究に従事。



**黒田 正博**

1980年三菱電機入社。2002年旧独立行政法人通信総合研究所、現情報通信研究機構勤務。2013年から静岡大学創造科学技術大学院客員教授、工学博士。現在、ボディエリアネットワークの省電力ネットワーク技術と省電力

セキュリティ技術の研究開発と実用化に従事。



**峰野 博史** (正会員)

1999年静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。NTTサービスインテグレーション基盤研究所を経て、2002年10月より静岡大学情報学部助手、博士(工学)。2011年4月より静岡大学情報学

部准教授。モバイルコンピューティング、センサネットワーク応用システムに関する研究に従事。