

# 農業疎密無線センサネットワークにおける Data MULE 型データ通信を利用するハイブリッドエネルギーハーベスティングセンサノードの開発と評価

中野 達彦<sup>1</sup> 中西 恒夫<sup>2</sup> 田頭 茂明<sup>3</sup> 荒川 豊<sup>4</sup> 福田 晃<sup>2</sup>

**概要:** センサの小型化, 低価格化, 高精度化に伴うセンサネットワーク技術の発展の影響は農業にも及び, 勘と経験の農業技術の見える化と農作物管理の高度化・高効率化を目指す環境情報モニタリング環境が構築されつつある. 我々は, 他どのセンサノードともマルチホップ無線通信によるデータ通信ができずに孤立するセンサノードが存在するような農業疎密無線センサネットワークにおいて農業技術の見える化を試みることを想定し, オープンソースハードウェアの Arduino を採用し費用を最小限に抑え, さらに太陽光と風力によるハイブリッドなエネルギーハーベスティングによって電源を確保し, 超音波距離センサあるいは 315MHz 無線通信を用いた起床で実現する省電力な Data MULE によってデータ通信を行うセンサノードのプロトタイプを開発した. さらに, 稼働時間に関して試算した結果, エネルギー供給は太陽光と風力で, 動作に支障なく十分に賄えることがわかった.

**キーワード:** 精密農業, 茶業, 農業疎密無線センサネットワーク, Data MULE, ハイブリッドエネルギーハーベスティング, 太陽光, 風力, 低価格化, Arduino

## Development and Evaluation of Hybrid Energy Harvesting Sensor Node trying Data MULE for Agricultural Sparse Wireless Sensor Network

NAKANO TATSUHIKO<sup>1</sup> NAKANISHI TSUNEO<sup>2</sup> TAGASHIRA SHIGEAKI<sup>3</sup> ARAKAWA YUTAKA<sup>4</sup>  
FUKUDA AKIRA<sup>2</sup>

**Abstract:** Such as minimization, cost reduction, and higher functionalization of sensors, the evolving wireless sensor network technologies are influencing more strongly especially to precision agriculture. In precision agriculture, environmental sensing is very important element. Now, in order to construct environmental sensing in a tea garden, we considered to introduce a sensor network. However, because it becomes an agricultural sparse wireless sensor network(ASWSN), it causes the problem that some sensor node cannot transmit with another node by ad-hoc transmission because of their farther distance. Additionally, it also causes necessity to ensure the enough power supply. In this paper, we develop the low-cost sensor node prototype using Arduino. It realizes power supply from solar and wind, and realized low-power Data MULE using either an ultrasonic distance sensor or a 315 MHz transceiver on sensor node's wakeup. Finally, we evaluate about the driving time by simulation, and report the result on installing in real-world outdoor experiment.

**Keywords:** Precision Agriculture, Tea, Agricultural Sparse Wireless Sensor Network, Data MULE, Hybrid Energy Harvesting, Solar, Wind, Low Cost, Arduino

<sup>1</sup> 九州大学 大学院 システム情報科学府  
Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

<sup>2</sup> 九州大学 大学院 システム情報科学研究院  
Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

<sup>3</sup> 関西大学 総合情報学部

Faculty of Informatics, Kansai University  
<sup>4</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科  
Graduate School of Information Science, Nara Institute Science and Technology

## 1. はじめに

農業は工業とは違い、生産現場の気象的要素が生産量や生産品の品質に大きく影響する。この気象的要素とは気温、湿度、日射量、降雨量、風速などの情報を指し、これらの気象的な変化が連なり中・長期的に観測される特性を天候、気候と称する [1]。気象的要素は、土壌の状態や害虫・病害の発生にも影響を及ぼし、二次被害的に農業に深刻な影響を与える。したがって、生産現場の気象的要素の把握は農業、特に精密農業 [2][3][4][5] にとって非常に重要である。この環境情報計測のアプローチには、衛星 [6][7]、センサネットワーク [8][9][10]、Data MULE [11][12] などが候補に挙がる。

本論文では、ある茶畑を、気象情報を含む環境情報計測環境として利用することを想定する。この茶畑は、現時点で既に 20ha と広大な展開面積を有し、さらに山頂に位置するため吹き曝しで気象の変化の激しい過酷環境である。比較的穏やかな気象時の景観を図 1 に示す。茶業にとって最重要となる気象情報は、積算温度、積算日射量、降雨量である。これらはそれぞれ、害虫発生の予測 (クワシロカイガラムシ [13] など)、収穫回数の見積もり、肥料散布時期の見積もりに必要となる。



図 1 冬(左)と夏(右)の茶畑の景観

この茶畑への計測環境の導入において、その広大な規模のため、電源確保とネットワーク敷設のコストが嵩むという問題が浮上した。同様の問題を有する計測環境構築の一般的なアプローチとは、各センサノードの電源をエナジーハーベストで確保し、収集した環境データは省電力化した Data MULE で回収・集約するというものである。

現在の農業には、農業機械という生産者にとって大きな負担となる要素が既に存在する以上、計測に関わる費用は出来る限り低減させなければならない。したがって、センサノードの単価が現実的な価格に収まることはもちろん、センサノードの管理費用も低減させる必要がある。また、データ喪失を起こさない信頼性、ヒューマンエラーを未然に防止するユーザビリティを実現することを想定する。特に後者については、メインの管理者たる農家の IT リテラシが必ずしも高いものではないことに起因する不測の事態の回避を考慮した結果である。

本論文では、農業疎密無線センサネットワーク (後述) 向けの、低価格化、高ユーザビリティ、高信頼性、計測 (センシング)、省電力な Data MULE、エナジーハーベストによる電源確保を盛り込んだセンサノードの新規開発について取り上げる。

## 2. 従来研究

### 2.1 Data MULE

#### 2.1.1 疎密な無線センサネットワーク

一般的な無線センサネットワークでは、各センサノードは周囲の通信可能なノードとアドホックに接続し、マルチホップ通信によってネットワーク全体を構築する。しかし稀に、周囲にアドホック接続可能なセンサノードが存在せず、目的地までのネットワークを持たないセンサノードが存在することがある。我々はこのようなネットワークを、疎密無線センサネットワーク (Sparse Wireless Sensor Network : SWSN) と定義した。SWSN が有するネットワーク欠落問題に対する解決策としては、Data MULE [11] が広く知られている。Data MULE は、Message Ferry [14] や Opportunistic Communication [15]、Encounter Data Transmission [16] などと呼ばれることもある。Data MULE は、ネットワークの穴を埋めるための、計測に本来必要のない余分な中継ノードを設置する費用を削減することができる手法として有用である。

#### 2.1.2 Data MULE プロトコル

Data MULE とは、例えば車や動物などを移動型のノードと見なし、データの中継・収集用のノードを設置し、ネットワークの欠落区間を物理的に運搬する手法である。Data MULE の構成は図 2 のようになり、移動体を移動型ノードの実体として MULE と称する。MULE・センサノード間、MULE・アクセスポイント (AP) 間の通信の実現には MULE の接近の検出が不可欠であり、さらに昨今の省電力化の需要から、一般的には通信をロー・デューティ・サイクルで駆動させる手法が採用される [17][18]、また、アドホック可能なセンサノード群はクラスターを成し、Data MULE を試みるノードにデータを集約する [19]。

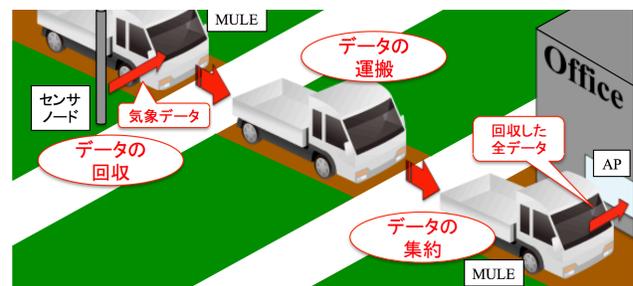


図 2 Data MULE の構成とデータフロー

## 2.2 フィールドサーバ

農業用センサノードに、フィールドサーバ(Field Server)がある[20][21]。無線LAN内蔵のWebサーバマシンをセンサノード化したものと言え、圃場に設置してセンシングを行う。このフィールドサーバはヒマラヤをはじめ、世界各地で稼働試験が行われている。さらに、高機能化したもの、低価格化したもの(OpenFS[22][23])など、用途に応じて様々のものが開発されている。

## 2.3 茶畑における気象情報計測の事前実験

今回の開発に先駆け、市販のセンサノードを使用して茶畑環境の事前調査を行なった。その際のセンサノードとその構成を図3に示す。霜害の予測[24][25]のため、地点ごとに地上、地表、地中と異なる高さ(深さ)の温度を計測している。この実験より、接続ミスなどのヒューマンエラーを防止するためにセンサノードのユーザビリティをより一層向上させるべきだということ、エネルギーの枯渇や外因性のエラーに起因するデータの喪失の防止を想定した設計の必要性が判明した。

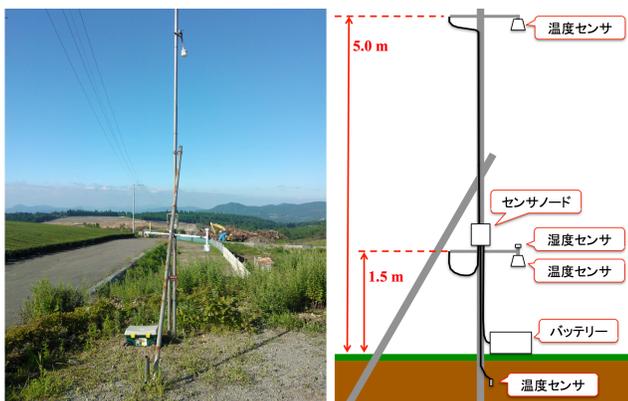


図3 茶畑における事前実験に設置したセンサノードと構成

## 3. センサノードに対する要求

- 定期的なセンシング(計測): センシングは10分ごと、少なくとも1時間ごとの間隔で、他のどのプロセスよりも高い優先度で周期的に実行される。即ち、センシング中にData MULEは実行されず、Data MULE中にセンシングが実行された場合は、Data MULEを破棄しセンシングを行う。センシングする環境情報データは、上空の温度、地上の温度、地中の温度、湿度、日射量、雨量、風速、風向、土壤の電気伝導度(EC)、土壤水分量(体積含水率)とする。
- 電源確保: センサノードはバッテリー駆動し、エネルギーハーベストでバッテリーを逐次充電する。エネルギー源には太陽光や風力などの自然エネルギーを想定する。

- Data MULEを用いた計測データの回収: Data MULEはセンシングより優先度は低く、プロセス実行の衝突時はセンシングを優先的に実行する。また、バッテリー駆動の観点から、Data MULEには省電力な手法を用いる。MULEには車を想定し、データ回収用のノードは車内に設置する。MULEの巡回は最長で一週間とし、その間の計測データを保管できる程度の容量のストレージを確保する。
- 信頼性: 計測データの喪失、計測ミスの回避を最優先に徹底する。即ち、エネルギーの枯渇、計測時間の喪失、計測データの喪失など、外的要因による稼働停止を含むあらゆるエラーを想定し、それを回避する。また、ヒューマンエラーを未然に防ぐためのユーザビリティ仕様として、導入のし易さ、管理のし安さ、交換のし易さなどを想定する。
- 低価格化: 将来的な実用化を考慮し、低価格化を設計・開発の基本とする。

## 4. 実装

本章にて、前述の要求を全て満たすセンサノードの新規開発について述べる。

### 4.1 Arduino ベースのセンサノード

センサノード全体の低価格化のため、オープンで安価なハードウェアであるArduinoシリーズをベースにセンサノードを構成する。バッテリー駆動とエネルギーハーベストによる充電を考慮し、リチウムポリマーバッテリーの充放電回路を有し、かつ省電力設計なArduino Fioを採用する。Arduino Fioを図4に示す。リチウムポリマーバッテリーは単価と容量のバランスを考慮し、1000mAhの容量のものを採用する。バッテリーの充電はUSB入力(5V)によって行う。



図4 Arduino Fio とリチウムポリマーバッテリー

### 4.2 ハイブリッドエネルギーハーベ스팅システム

リチウムポリマーバッテリーには充放電サイクルの上限という形で寿命があるため、エネルギーハーベストによる電源確保では自然エネルギー源の不規則性が問題となる。即ち、電力需要を発電量で賄える場合と、電力需要を発電量で賄えなくなった場合の、Arduino Fio・リチウムポリマーバッテリー間のエネルギー・フローの不安定な切り替わり

が問題となる。

この問題に対して、エネルギー源を太陽光と風力のハイブリッドにすることで不規則性を緩和するアプローチを採用する。図5のエネルギー・フロー図のように、太陽光パネルと風力発電機のそれぞれの出力を並列化するためのシステムを介して、Arduino Fio に入力する。



図5 ハイブリッドエネルギーハーベストシステムのエネルギー・フロー

### 4.3 アクティブ・ウェイクアップ型 Data MULE

省電力な Data MULE の実現手法には、ロー・デューティ・サイクルによるものが一般的だが、我々は過去の研究で超音波距離センサをセンサノードの起床に用いたアクティブ・ウェイクアップ型の手法を提案している [16]。これらの違いは図6のような電力消費メカニズムの違いにあり、省電力化の効果はケース・バイ・ケースで一意にその優越をつけることは出来ないが、今回ターゲットとする茶畑での運用を含む多くの場合において、我々の手法の方が省電力化の効果が高いと想定している。

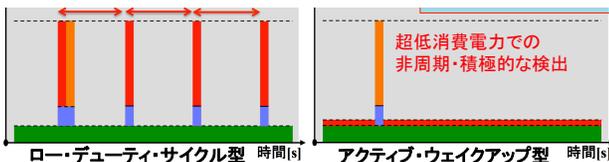


図6 Data MULE の省電力化手法の電力消費の対比

超音波距離センサの設置角度と検出閾値についての考慮が必要である。設置角度は、図7のように MULE の進行方向に垂直に固定する。検出閾値は、超音波距離センサの距離取得値が二値ではないために必要で、本論文では 400cm に固定している。したがって、普段環境情報センサを含むセンサノード本体はスリープ状態で省電力化を図り、低消費電力で独立駆動する MULE 接近検出システムにおいて超音波距離センサ・MULE 間の最短距離が閾値の 400cm を下回ったと判断した時に限り MULE の接近を検出したと判定し、センサノード本体を起床させ、データ通信を試みるということになる。

また今回の開発では、センサノードの起床に、超音波距離センサと同等程度に省電力化が可能な 315MHz 無線通信を用いたアプローチも用意する。基本的に超音波距離センサを起床に用いた Data MULE を想定し、超音波距離センサの検出が困難な環境では 315MHz 無線通信を起床に用い

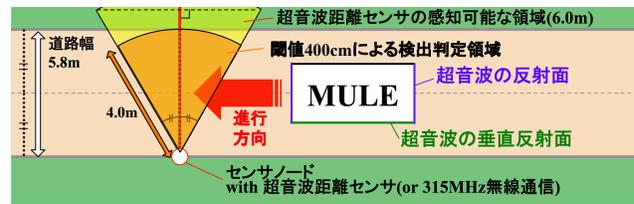


図7 超音波距離センサの設置角度と検出判定領域

た Data MULE で代替する。

### 4.4 信頼性向上設計

計測ミスを回避するため、時間維持のシステム (リアル・タイム・クロック) を別用途とし、専用のバックアップ電源を設け、万が一システム本体からの給電が停止した場合でもある程度時間を保持し続ける設計とする。センシングはこのリアル・タイム・クロックからの割り込みで生起する。

エネルギー枯渇によるデータの喪失を防ぐため、ストレージには不揮発性の SD を用いる。

エネルギー枯渇を防ぐため、消費電力の高い環境情報センサと SD の柔軟な電力制御を、ハイサイド・スイッチによって行う。

ヒューマンエラーを防止するための高ユーザビリティ設計として、複数ある環境情報センサの自動認識 (Plug&Play) を導入し、接続インターフェースの簡素化を行う。

## 5. 評価

開発したセンサノードの特性、運用を想定した場合の試算、及び、実際の屋外稼働試験の途中経過より評価する。

### 5.1 システム構成と電気的特性

センサノードの全体構成としては、SD、リアル・タイム・クロック、MULE 接近検出システム (超音波距離センサ版 or 315MHz 版)、無線通信モジュール (XBee)、そして複数の環境情報センサが、Arduino Fio のアナログ/デジタルポートを介して接続されることになる。ハイブリッドエネルギーハーベストによる充電は USB 入力を通じて行い、バッテリー専用コネクタを介してリチウムポリマーバッテリーとの充放電を行う。

電気的特性を表1に示す。消費電流値は基本的に平均値を採用するが、SD 書込時、XBee 通信時は最大値を示す。センシング時の値に、各種環境情報センサの消費電力は考慮していない。また、発電量も同様に平均値を採用する。発電電流値は、太陽光パネル及び風力発電機の出力に関する事前調査の実験結果と、気象庁及び NEDO の日射量及び風況のデータベースを照合して算出している。

表 1 センサノードの電気的特性

基本項目		特性値	単位
動作電圧		3.3	V
本体動作	スリープ	1.1	mA
	基本駆動	8.8	mA
	SD 書込	最大 +30.0	mA
	XBee 通信	最大 +50.0	mA
MULE 接近検出	超音波距離センサ	+3.0	mA
	315MHz 無線	+1.0	mA
発電	太陽光	29.0	mA
	風力	10.0	mA

## 5.2 試算による評価

センシングの頻度を 10 分に 1 回、データ読込に必要な時間を 1 秒とする (環境情報センサの値の収束時間を含む)。また、SD 書込に 0.5 秒、XBee によるデータ通信に 1 秒必要とする。MULE 接近検出には超音波距離センサによる手法を採用し、常時駆動を前提とする。最後に各種環境情報センサの消費電流を総じて 50mA と仮定する。これらに従い、図 8 のようなフローを想定し、データ通信により大きな電力消費のある場合のセンシング一周期分の消費電力を算出する。

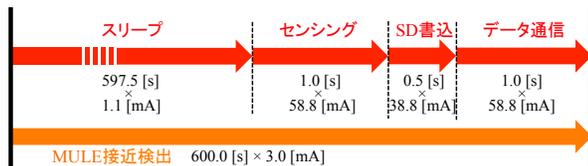


図 8 試算条件：センサノードの一センシング周期あたりの動作フローと消費電力

試算の結果、一センシング周期では、発電電力は消費電力の 9 倍以上となり、平均的には発電能力は十分に要求を満たすことがわかった。バッテリーに 1000mAh と大容量のものを使用しているため、最大 9 日程度は発電が一切なくとも稼働できる。エネルギー源である太陽光と風力の不規則性を考慮しても十分な余裕があると言え、試算上では十分な電源が確保できていると判断した。

しかし今回の試算では、バッテリー性能や充電時のエネルギーロス、起床時のエネルギーオーバーヘッドなど、考慮していない要因が多く存在する。さらに、実環境では太陽光パネルの汚れやバッテリーの劣化など、試算では予測できない要因が存在するため、実際に実証実験を行い評価する必要がある。

## 5.3 稼働実験による評価

実環境における稼働試験を現在行なっている。ただし、長期稼働試験には至っておらず、現在はセンサノードのパッケージングやセンサの固定方法など、導入時における

課題の炙り出しを行なっている。この実験は、屋外稼働における試験が目的であり、本格運用を想定した環境 (例えば、5m 上空の気温計測など) の構築は実施していない。現在のセンサノードとその構成は図 9 のようになる。

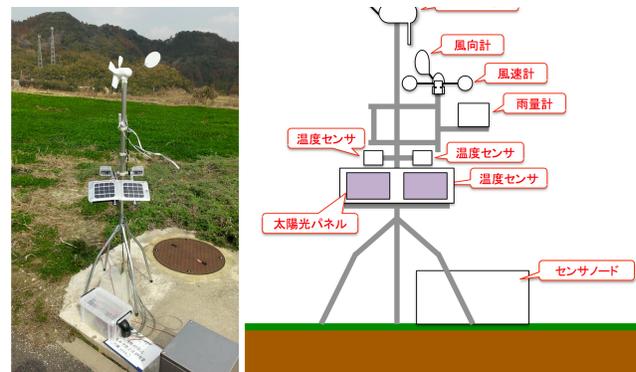


図 9 屋外稼働試験中のセンサノードと構成

現時点で、センサノード導入時の最大の課題に挙がっているのは、結露防止のためのセンサノードのパッケージングである。結露の防止には、真空断熱などを用いて完全密閉する方法か、通気性の良い専用ケースを準備する方法が有効であると思われる。現時点では、真空断熱ではないが、完全密閉と内部の除湿によるパッケージングを用いたアプローチを試している。

温度センサや湿度センサなど、外気に露出する必要がある環境情報センサの結露、錆、汚れなども問題に挙がっている。これらが原因で、環境情報センサの動作不良や取得データに誤差を生じさせる可能性が有るためである。

今回開発したセンサノードにはリチウムポリマーバッテリーを搭載しているが、リチウムポリマーバッテリーを使用する際、過電流による発火の危険性を考慮しなければならない。現時点では、センサノードに特別な処置を施しているわけではないため、結露などが原因で発火が起こる可能性が否めない。火災という大きな事故に繋がる要因でも有るため、今後この不安点に対して十分に考慮する必要がある。

## 6. 結論

本論文では、茶畑における精密農業の実現に向けた、気象や土壌などの環境情報計測システムに着目した。この茶畑では、設置するセンサノードそれぞれに電源を確保する必要があること、センサノードの疎密配置によりネットワークが欠落することが問題となり、既存のセンサノードによるアプローチはコスト的に難しく、したがってこれらを一挙に解決できるエネルギーハーベストによる電源確保と省電力な Data MULE によるアプローチを行うセンサノードを新規に開発した。エネルギー源には太陽光と風力を用い、

Data MULE の省電力化は超音波距離センサや 315MHz 無線通信をセンサノードの起床に用いる手法で実現した。発電電力が消費電力を大幅に上回るという試算より、理論的にはこのシステムの動作を太陽光と風力による発電で賄うことが可能だと結論づけた。現在は実環境での稼働実験を通してこの試算の実証を行っており、導入時の課題の洗い出しを実施している段階である。

#### 謝辞

本研究は、戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の研究助成による成果である。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] 生井 兵治, 相馬 暁, 上松 信義 (編著), 『新版 農業の基礎』, 農山漁村文化協会, 2003.
- [2] 澁澤 栄 (編著), 『精密農業』, 朝倉書店, 2006.
- [3] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, and J. I. Robla, "A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry," *Sensors*, Vol. 9, No. 6, pp. 4728–4750, 2009.
- [4] A. Baggio, "Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture," *Proc. Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN)*, 2005.
- [5] M. Keshtgary, and A. Deljoo, "An Efficient Wireless Sensor Network for Precision Agriculture," *Canadian J. on Multimedia and Wireless Networks*, Vol. 3, No. 1, 2012.
- [6] D. B. Lobell, J. A. Hicke, G. P. Asner, C. B. Field, C. J. Tucker, and S. O. Los, "Satellite Estimates of Productivity and Light Use Efficiency in United States Agriculture," *Global Change Biology - GLOB CHANGE BIOL*, Vol. 8, No. 8, pp. 722–735, 2002.
- [7] 石黒 悦爾, 小川 幸春, 宮里 満, 陳 介余, "リモートセンシングによる霜害茶畑の検出", 鹿児島大学農学部学術報告, Vol. 44, pp. 35–41, 1994.
- [8] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey," *Computer Networks*, Vol. 38, pp. 393–422, 2002.
- [9] W. S. Lee, V. Alchanatis, C. Yang, M. Hirafuji, D. Moshou, and C. Li, "Sensing Technologies for Precision Specialty Crop Production", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 74, No. 1, pp. 2–33, 2010.
- [10] M. Barnes, C. Conway, J. Mathews, and D. K. Arvind, "ENS: An Energy Harvesting Wireless Sensor Network Platform", *Proc. Int. Conf. on Systems and Networks Communications (ICSNC)*, pp. 83–87, 2010.
- [11] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data MULEs: Modeling a Three-Tier Architecture for Sparse Sensor Networks," *Proc. Int. Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, pp. 30–41, 2003.
- [12] J. Burrell, T. Brooke, and R. Beckwith, "Vineyard Computing: Sensor Networks in Agricultural Production," *Pervasive Computing*, Vol. 3, No. 1, pp. 38–45, 2004.
- [13] 小澤 朗人, 久保田 栄, "有効積算温度によるクワシロカイガラムシのふ化最盛日予測法の検証", 静岡県茶業試験場研究報告, Vol. 25, pp. 23–31, 2006.
- [14] M. M. B. Tariq, M. Ammar, and E. Zegura, "Message Ferry Route Design for Sparse Ad Hoc Networks with Mobile Nodes," *Proc. Int. Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, pp. 37–48, 2006.
- [15] D. Hadaller, S. Keshav, T. Brecht, and S. Agarwal, "Vehicular Opportunistic Communication under the Microscope," *Proc. Int. Conf. on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys)*, pp. 206–219, 2007.
- [16] T. Nakano, Y. Arakawa, S. Tagashira, A. Fukuda, and R. Dhaou, "Proposal and Implementation of Encounter Data Transmission with Ultrasonic Sensor-Based Active Wakeup Mechanism for Energy Efficient Sparse Wireless Sensor Network," *Proc. Int. Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (HWISE)*, pp. 393–400, 2013.
- [17] G. Anastasi, M. Conti, E. Monaldi, and A. Passarella, "An Adaptive Data-Transfer Protocol for Sensor Networks with Data Mules," *Proc. Int. Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pp. 1–8, 2007.
- [18] X. Wu, K. N. Brown, and C. J. Sreenan, "SNIP: A Sensor Node-Initiated Probing Mechanism for Opportunistic Data Collection in Sparse Wireless Sensor Networks," *Proc. Int. Workshop on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 726–731, 2011.
- [19] J. Lebrun, C. Chuah, D. Ghosal, and M. Zhang, "Knowledge-Based Opportunistic Forwarding in Vehicular Wireless Ad Hoc Networks," *Proc. Conf. Vehicular Technology*, Vol. 4, pp. 2289–2293, 2005.
- [20] T. Fukatsu, and M. Hirafuji, "Field Monitoring Using Sensor-Nodes with a Web Server," *J. Robotics and Mechatronics*, Vol. 17, No. 2, pp. 164–172, 2005.
- [21] S. Ninomiya, "Successful Information Technology (IT) for Agriculture and Rural Development," *Extension Bulletins - Food and Fertilizer Technology Center*, Vol. 549, pp. 1–19, 2005.
- [22] 深津 時広, "圃場モニタリングを実現するアグリセンサネットワーク", 農業情報学会 2012 年度年次大会, pp. 73–74, 2012.
- [23] M. Hirafuji, H. Yoichi, T. Kiura, K. Matsumoto, T. Fukatsu, K. Tanaka, Y. Shibuya, A. Itoh, H. Nesumi, N. Hoshi, S. Ninomiya, J. Adinarayana, D. Sudharsan, Y. Saito, K. Kobayashi, and T. Suzuki, "Creating High-Performance/Low-cost Ambient Sensor Cloud System Using OpenFS (Open Field Server) for High-Throughput Phenotyping," *Proc. SICE Annual Conference 2011*, pp. 2090–2092, 2011.
- [24] 有坪 民雄, 『農業のしくみ』, 日本実業出版社, 2003.
- [25] 堀江 武, 『新版 作物栽培の基礎』, 農山漁村文化協会, 2004.