

## 2-4 農業・漁業センシング等に有効な省電力グリッド技術の研究開発

児島史秀

本報告では、複数の無線端末が網目(グリッド)状の接続トポロジを構成し動作するワイヤレスグリッド構造の一動作形態であり、各端末が電池駆動である状況等に有効な省電力動作に関する研究開発について述べる。本研究開発では、省電力動作を実現するために、スリープ期間を活用した省電力 MAC 制御を実現しながら、端末同士で通信の中継を行う、省電力マルチホップ通信形態の実装について検討した。具体的には、国際標準規格 IEEE 802.15.4e にて定義される省電力スーパフレーム構造を適用し、無線パーソナルエリアネットワーク(PAN: Personal Area Network)を構成する各端末が時間同期を取りながら間欠的待受けを行うことで、ネットワーク全体の消費電力を低減し、適切なツリー形状の中継通信マルチホップ通信を実現した。その結果、理論上では単三型乾電池3本程度の電池容量で、10年以上の動作が可能である省電力マルチホップ動作のための技術仕様を策定するとともに、本仕様を具備する省電力無線機を開発し、動作実証を行った。また、本無線機の活用事例として、当該無線機搭載センサブイによる、もずく養殖場における定期的な水温・塩分濃度センシングを行った。さらに、漁業分野のみならず、農業分野における水管理業務への当該無線機の適用について検討し、圃場水位等の情報の省電力センシングと、ポンプ等の農業用機器の低遅延制御が両立されるような省電力無線機の設定について検討し、実証した。

### 1 まえがき

情報通信研究機構(NICT)では、近年需要が高まっているIoT分野において効果が期待される、複数の無線端末同士が網目(グリッド)状の接続トポロジを構成し動作するワイヤレスグリッド構造の有効利用及び社会展開について研究開発を行っている。ワイヤレスグリッド構造の最も典型的な適用例のひとつとして、無線機を搭載したスマートメータにより形成され、メータ自動検針、制御等を実現するスマートユーティリティネットワーク(SUN: Smart Utility Network)が挙げられる[1][2]。SUNの概要を図1に示す。SUNの主な技術的課題として、以下の2つが考えられている。

- ① 電池による運用を可能とする省電力技術
- ② サービスエリアを拡張するマルチホップ技術

ここで①は、ガスメータや水道メータのように、電線等によるメータ外部からの電源供給が容易でなく、内蔵電池でのメータ及びSUN無線機の動作を想定する場合に特に重要となる技術である。消耗による電池交換頻度の増大は、そのための交換コストによってSUNシステム的前提を覆しかねない問題であることは言うまでもない。メータ運用の見地から、一般には、電池を交換することなく、10年以上の継続動作が目標とされている。

次に②は、図1に示されているように、収集制御局から遠くに設置されたメータや、集合住宅内等遮蔽された環境に設置されたメータが、距離及び遮蔽による無線電波の減衰を受け、直接通信のみでは所望のサービスエリアを実現できない場合に、各メータが中継局の役割を果たし、多段中継を行うことで全ての検針データを確実に収集する技術である。距離による減衰の場合には、マルチホップ技術を導入すると多段中継により、電波到達距離を直線的に増大することができ、また遮蔽による減衰の場合には、多段中継を用いて減衰の少ない迂回経路を確立することで、電波の不感地帯を解消することができる。結果的に、マルチホップ技術により、サービスエリアの拡張がもたらされる。

NICTでは、SUNの効果的な実装を目的として、省電力マルチホップ通信技術の確立に関する研究開発に取り組んでいる。図1に示すとおり、SUNはスマートメータシステムのみならず、センサネットワーク等の多様な用途への有効性が予想される。本稿では、省電力マルチホップ通信技術に関する研究開発と、漁業、農業への適用実証について述べる。

### 2 省電力マルチホップ通信技術の概要

#### 2.1 省電力 MAC 方式の概要

図2に、本研究開発において適用する省電力 MAC

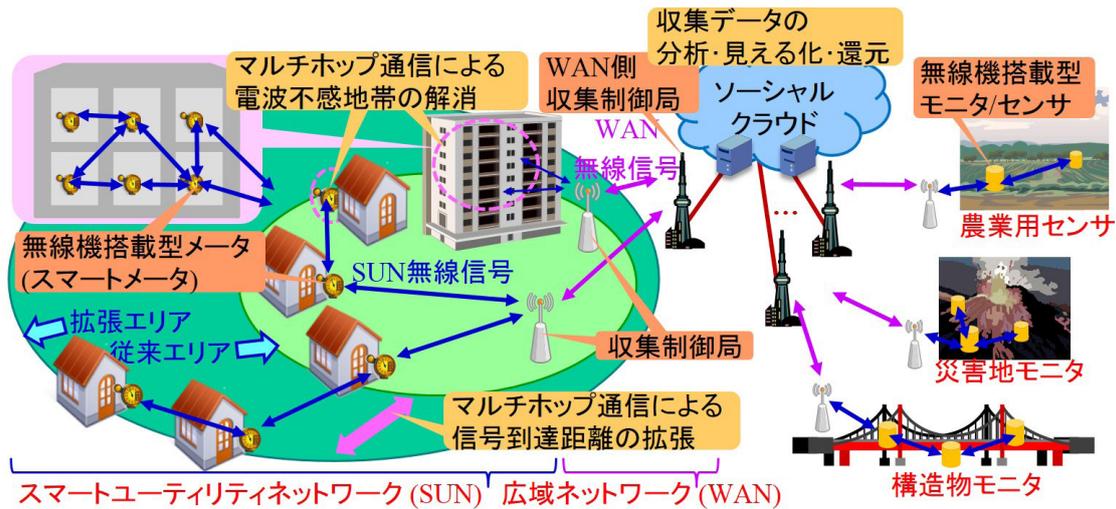


図1 スマートユーティリティネットワークの概要

方式 [3]-[7] の動作例を示す。本 MAC は、NICT が提案し、IEEE 802.15.4 e において定義される省電力スーパーフレーム構造を適用している [8][9]。スーパーフレームとは、時分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access) 制御の基本となる時間周期であり、周期的なビーコン信号によって規定される。基本的な時間単位となるビーコン間隔 (BI: Beacon Interval) は、アクティブ (送受信、または待受け) 期間 (AP: Active Period) とスリープ (電源を落とし、送受信、待受けの動作も行わない) 期間 (SP: Sleep Period) に分割され、アクティブ期間は実質的な通信期間として運用される一方で、スリープ期間では各デバイスはスリープ状態に入ることができる。省電力動作のために、ビーコン信号は毎スーパーフレームに送信されるのではなく、原則的に時間同期が必要な場合のみ送信される。また、図のようにアクティブ期間は、データフレームより短期間となる場合があり、データフレームの終了はアクティブ期間内に制限されず、次のスーパーフレームの開始時点以前であればよいとする。結果として、データフレーム長にかかわらずアクティブ期間を短縮化することが可能となる。すなわち、各端末によるデータフレームの送受信の開始及び待機のための受信状態はアクティブ期間においてのみ行われ、スリープ期間ではアクティブ期間から継続するデータフレーム送受信にかかわる端末以外はスリープ状態に入ることができるため、消費電力の低減が図られる。

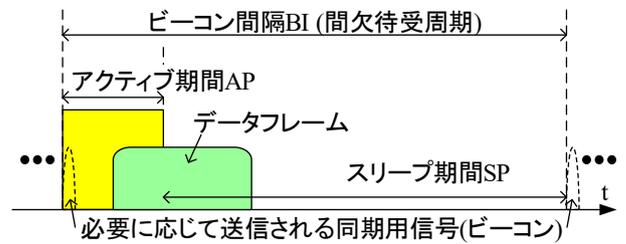


図2 省電力MAC方式の動作例

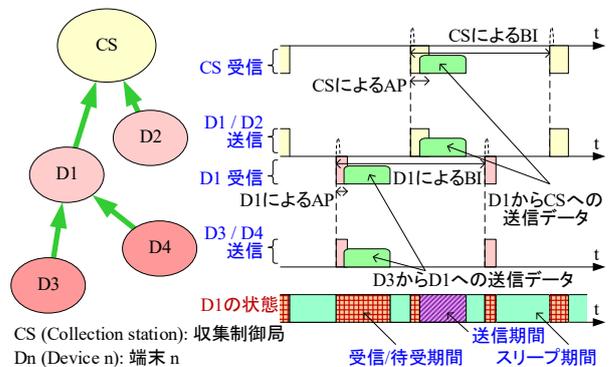


図3 マルチホップ通信の動作例

## 2.2 PAN トポロジにおけるマルチホップ通信

図3に、SUNにおいて前提とされるパーソナルエリアネットワーク (PAN: Personal Area Network) のトポロジにおいて、前節で述べた省電力MAC方式を用いてマルチホップ通信を実現する動作例を示す。

PANは、IEEE 802.15.4規格 [10]によって規定される無線端末ネットワークであり、最初に起動されPAN設立を宣言するPANコーディネータと呼ばれる無線端末と、それ以降に起動され、PANに対して加入手続きであるアソシエーションを行う無線端末によって構成される。アソシエーションを行う無線端末と、アソシエーションを受理する無線端末の関係に注目すると、PANコーディネータを根とするツリー構造のPANトポロジを見出すことができ、本検討では、本ツリー構造を利用し、PANコーディネータを収集局

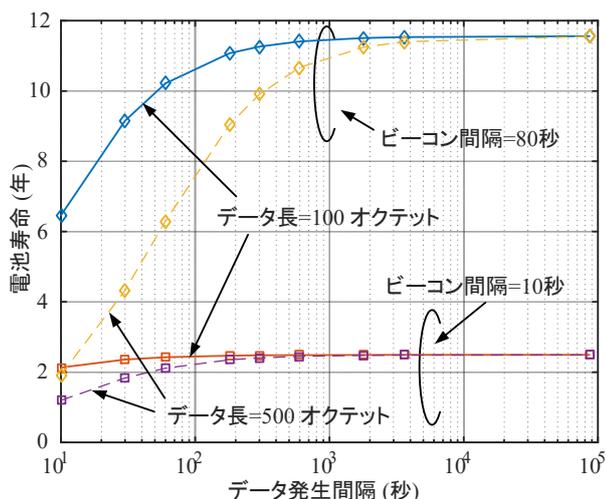


図4 電池寿命の試算

(CS: Collection Station)として、他の端末からのデータを収集するマルチホップ通信形態を提案する。図3では、D3あるいはD4の端末がD1へとデータフレームを送信する場合には、D1の規定するスーパーフレームに従い、それに対してD1がCSに送信する場合には、CSのスーパーフレームに従って送信していることが確認できる。

図4に、上述した省電力マルチホップ通信を前提とした場合の、電池寿命の試算結果を示す。想定する電池容量は、単三乾電池3本としている。試算結果により、ビーコン間隔が80秒、データ長が100オクテットとした場合で、データ発生間隔が1分程度の場合に、10年以上の電池寿命を期待できることがわかった。

### 2.3 制御等のための低遅延通信の検討

省電力動作の根本的原理が、スリープ期間の導入による間欠的な待受けであることは前節までに述べたとおりである。一方でワイヤレスグリッドの動作形態と

して、無線端末に接続される機器としてセンサ等を想定し、主に各端末から収集制御局へのデータ伝送が行われるセンシング動作のほかに、無線端末に接続される機器としてアクチュエータ等を想定し、収集制御局から各端末へのデータ伝送を行う制御動作も含まれると考えられる。そのような制御動作については、スリープ期間の導入により必然的にもたらされる遅延が深刻となる場合があることが予想される。そこで本研究開発では、省電力のセンシング動作と並行して、低遅延の制御動作を実現する形態について検討している。図5に低遅延通信の概念を示す。本検討ではPANにおいて、上述のアクチュエータ等が接続される端末を被制御端末、また収集制御局から、当該被制御端末までのマルチホップ通信経路に存する端末を制御支援端末と定義し、被制御端末及び制御支援端末については、制御動作のためのデータ伝送を扱うことから、上記のスリープ期間を調整し、遅延時間が許容範囲に収まるような動作を行う。図5は最も明快な例で、被制御端末及び制御支援端末はいずれもスリープ期間を適用しない動作例を示している。

提案する低遅延通信の動作を確認するための評価試験について、概要を図6に、結果を表1にそれぞれ示す。表1は、図6(b)における端末D4、D5に対するCSからのデータ伝送について、遅延時間に関する特性をまとめたものである。図6(b)では、各端末はビーコン間隔を10秒とするマルチホップ通信トポロジを構成しているが、端末D5、D2はそれぞれ被制御端末、制御支援端末として設定され、スリープ期間を導入しない動作を行うものとした。その結果、表1のとおり、低遅延動作を行わない場合には、ビーコン間隔に起因する遅延が発生するが、低遅延動作によりその影響が解消されることがわかった。

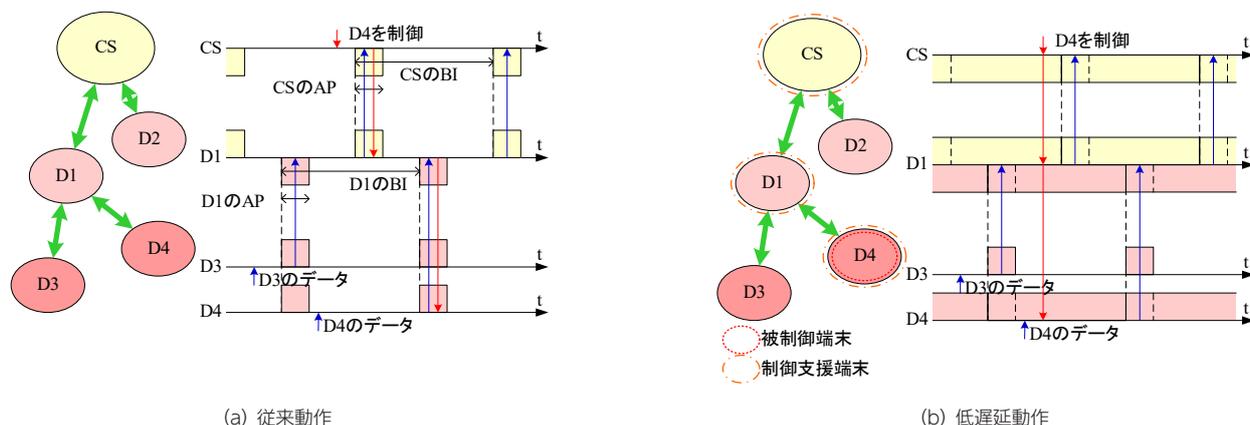
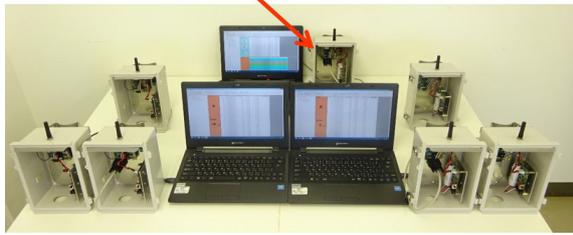


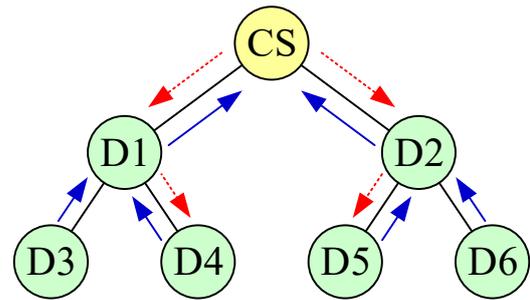
図5 低遅延通信の概念

省電力無線機(収集制御局側)



省電力無線機(末端機器側)

(a) 機器構成



← 収集データの流れ  
← 制御データの流れ

(b) トポロジとデータ伝送の概要

図6 低遅延通信評価試験の概要

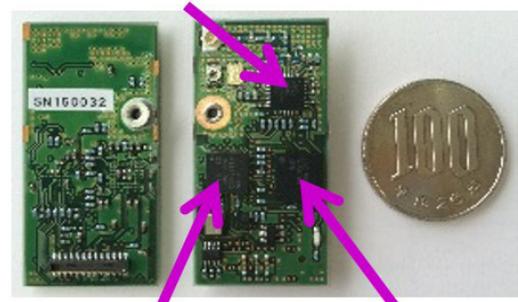
表1 低遅延通信の評価結果

| 制御先無線機       | 平均遅延時間  | 遅延時間分散               |
|--------------|---------|----------------------|
| D5 (低遅延動作あり) | 0.0 s   | 0.0 s <sup>2</sup>   |
| D4 (低遅延動作なし) | 15.15 s | 16.87 s <sup>2</sup> |

表2 省電力無線モジュールの諸元

|            |   |
|------------|---|
| サイズ        | 20 mm × 40 mm × 3 mm                      |
| 重量         | 4 g                                       |
| 周波数帯       | 920.6 ~ 928.0 MHz                         |
| 送信電力       | 20 mW                                     |
| 変調方式       | 2 GFSK                                    |
| データレート     | 50, 100, 200 kb/s                         |
| 消費電流       | Active state: 50 mA<br>Sleep state: 30 μA |
| 入出力インタフェース | シリアル                                      |

物理層集積回路



MAC層集積回路

制御用MCU

図7 省電力無線モジュールの外観

### 3 省電力無線機の開発と実装

#### 3.1 省電力無線モジュールの概要

図7に、開発された省電力無線モジュールを示す。また、表2に本モジュールの諸元を示す。本モジュールは、多様な利用形態を想定したうえでのFEC (Forward Error Correction: 前方誤り訂正) 等、付加的機能まで含めたうえで、物理層・MAC層集積回路及び制御用MCU (Micro Controller Unit: 組込型マイクロプロセッサ) の4 cm × 2 cmの基盤上での極小構成に成功している。本モジュールは、スマートメータへの収容のみならず、風雨の影響を考慮した屋外設置型モニタリングポストへの設置や、USB端子を具備したプラグイン型の小型無線機等、センサ等接続機器と同様に、極めて多様な利用環境に展開されることが予想される。

#### 3.2 漁業分野への適用実証

以降では、省電力無線モジュールを組み込んだ省電力無線機の適用による、省電力ワイヤレスグリッドの実証について報告する。本節では漁業分野への適用実証として、もずく漁業における遠隔センシングの例を述べる。本実証では、沿岸より2 km程度離れた海域の、深さ約8 mの海底にあるもずく養殖場近辺の水温及び塩分濃度を測定するセンサに接続され、同時に頂上部分に省電力無線機を搭載したセンサブイを海面に複数敷設し、省電力マルチホップ通信を介して沿岸の建物内まで定期的に得られた上記センシングデータを収集することに成功した。図8に本実証におけるセンサブイの外観、図9にセンサブイ設置の外観をそれぞれ示す。

### 3.3 農業分野への適用実証

本節では農業分野への適用実証として、圃場の水管理業務における、省電力無線機を用いた遠隔センシング及び遠隔制御について述べる。本実証では圃場の水位センシングを想定した水位センサのほか、制御の対象となるポンプ、バルブ、さらに農業業務にて制御機器として用いられる場合がある PLC (Programmable Logic Controller) のそれぞれに対して、省電力無線機を接続し、無線通信を介して、省電力センシングと、低遅延の制御を両立し、PAN 全体で適切に省電力動作を実現する形態を成功裏に運用した。図 10 に、実験棟内部の実験用圃場にて行われた本実証を示す。なお、今後、屋外の実際の圃場への拡張実証を予定している。

要となる多様な適用分野を想定した、更なる機能の拡張が今後の検討の課題である。

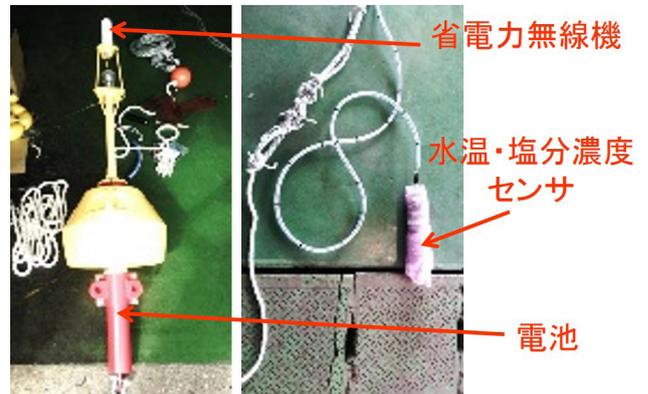


図 8 センサの外觀

## 4 あとがき

本稿では、ワイヤレスグリッド構造の一動作形態として、特に省電力動作に関する研究開発について述べた。省電力マルチホップ通信形態の実装について検討した結果、理論上では単三型乾電池 3 本程度の電池容量で、10 年以上の動作が可能であることがわかった。さらに、省電力無線機を開発し、本無線機の活用事例として、もずく養殖場における定期的な水温・塩分濃度センシングを行った。続いて、農業分野において、圃場水位等の情報の省電力センシングと、ポンプ等の農業用機器の低遅延制御を両立されるような省電力無線機の設定について検討・実証した。省電力動作が必



図 9 センサ設置外観

### 省電力無線機接続農業機器(PLC)

省電力無線機

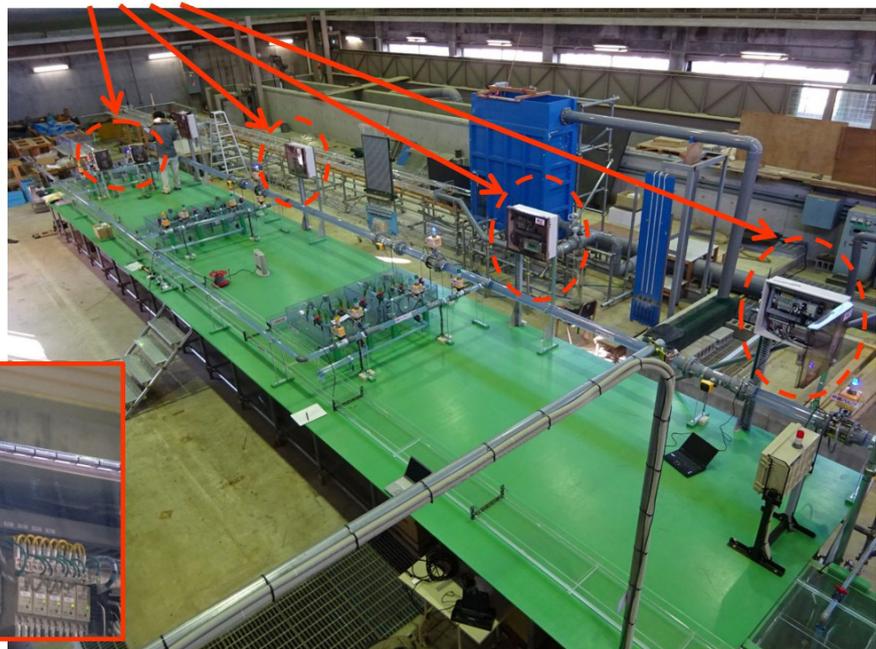
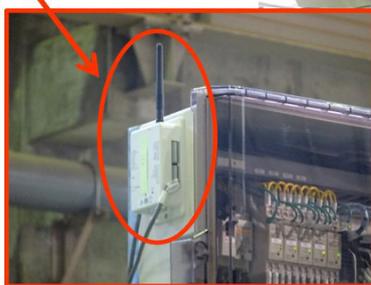


図 10 農業機器への省電力無線機適用実証

### 謝辞

SUN は、現京都大学原田博司教授により、IEEE 802.15.4 g [1] として標準化され、同じく規格認証団体 Wi-SUN アライアンス [11] の設立を通じて社会展開が推進されている。加えて、本報告の一部の研究開発は、内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「次世代農林水産業創造技術」(管理法人：農研機構 生物系特定産業技術研究支援センター) によって実施された。

### 【参考文献】

- 1 IEEE802.15.4 g, "Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), Amendment 3 : Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks," 2012.
- 2 Y. Rachlin, R. Negi, and P. Khosla, "Sensing capacity for discrete sensor network applications," in Conf. Rec. 2005 IEEE Information Processing in Sensor Networks, pp.126-132.
- 3 J. L. Hill and D. E. Culler, "Mica: a wireless platform for deeply embedded networks," 2002 IEEE Micro 22, pp.12-24.
- 4 W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks," in Conf. Rec. 2002 IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), pp.1567-1576.
- 5 T. v. Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," in Conf. Rec. 2003 Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), pp.171-180.
- 6 A. El-Hoiydi and J.-D. Decotignie, "WiseMAC: an ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks," in Conf. Rec. 2004 International Symposium on Computers and Communications, pp.244-251, vol.1.
- 7 W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in Conf. Rec. 2000 Hawaii International Conference on System Sciences, pp.1-10, vol.2.
- 8 F. Kojima and H. Harada, "Superframe Division Multi-Hop Data Collection with Aggregation on Wi-SUN Profile for ECHONET Lite," Conf. Rec. 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, pp.116-121
- 9 IEEE802.15.4 e, "Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), Amendment 1 : MAC sublayer," 2012.
- 10 IEEE802.15.4, "Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN)," 2009.
- 11 Wi-SUN alliance, "Wi-SUN alliance," <http://www.wi-sun.org/>



**児島史秀** (こじま ふみひで)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター  
ワイヤレスシステム研究室  
室長  
博士(工学)  
無線通信、無線アクセス制御