解説

ワイヤレスグリッド技術の新展開

Novel Development Activities of the Wireless-grid Technology

児島史秀

Abstract

本稿では，複数の無線端末が網目（グリッド）状のトポロジーで動作するワイヤレスグリッド構造の一形態として，スリープ期間を活用し端末同士で通信の中継を行う，省電力マルチホップ通信方式の研究開発を述べる．本方式では，各端末が時間同期を取りながら間欠的待受けを行う省電力スーパフレームによりトポロジー全体の消費電力が軽減され，単3形乾電池3本程度で10年以上の動作が可能である．更に，農業分野における水管理業務への提案方式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の両立動作を実証した．

キーワード：SUN，省電力，MAC，農業

1. はじめに

2020年における導入が見込まれている次世代陸上移動通信システム（5G）では，従来の10倍以上に相当する10 Gbit/s以上の高速伝送特性だけでなく，局面に応じて低遅延特性，多数接続特性等の要件が複合して要求される状況への対応可能性が特徴とされている[1]．5Gは，これまでに存在しない多様な無線通信サービスの実現を示唆するものであるが，中でも最も高い需要が予想されるサービスの一つは，‘もの’同士の無線通信を想定するInternet of Things（IoT）分野におけるものであると考えられる．

国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT : National institute of Information and Communications Technology）では，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）状の接続トポロジー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．本稿では，ワイヤレスグリッド構造を実現するための有望な技術の一つとして，省電力マルチホップ通信技術を提案し，基本動作性能の評価と，農業分野への適用実証について述べる．

2. ワイヤレスグリッド技術の概要

本稿では，ワイヤレスグリッド構造の最も典型的な適用例の一つとして，世界的に注目を集めると同時に国際標準化も行われている無線システムであるスマートユーティリティネットワーク（SUN : Smart Utility Network）[2],[3]を挙げ，同システムの実現に必要とされる技術仕様について考察を行う．

2.1 システム概要

SUNの概要を図1に示す．SUNは，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，制御等を実現する無線システムである．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ている．

2.2 技術的要件

SUNの主な技術的課題として，以下の二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通信技術

ここで①は，ガスメータや水道メータのように，電線

児島史秀　正員　国立研究開発法人情報通信研究機構ワイヤレスネットワーク総合研究センター
E-mail　f-kojima@nict.go.jp
Fumihide KOJIMA, Member (Wireless Networks Research Center, The National Institute of Information and Communications Technology, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan).
電子情報通信学会誌　Vol.101 No.7 pp.667-672 2018年7月

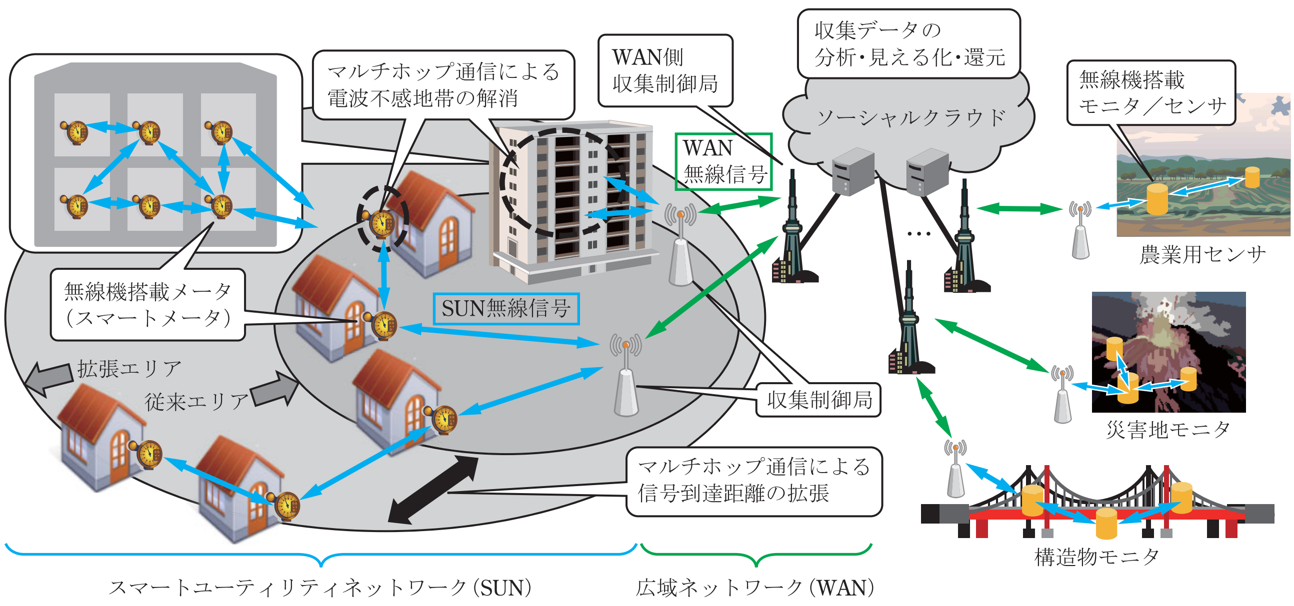


図1　SUNの概要　SUNは無線機を搭載したスマートメータにより構成され，メータ検針・データ管理・メータ制御等を無線通信により効率的に実現するための無線システムである．

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システムの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，それぞれ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．マルチホップ通信技術を導入すると，距離による減衰の場合には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う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．

3. 提案システム

3.1　省電力動作の原理

SUNの省電力動作を実現するために，システムを構成する各無線機におけるMAC（Media Access Control）制御による実装について検討する．図2に，省電力MAC方式[(4)~(6)]の動作例を示す．本MAC方式は，NICTが提案し，IEEE 802.15.4eにおいて定義される省

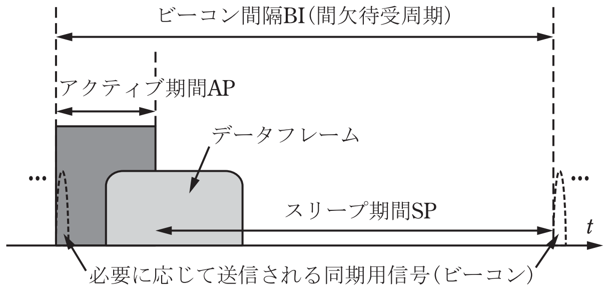


図2　省電力MAC方式の動作例　省電力スーパフレーム構造を利用した間欠的待受動作により，平均消費電力の大幅な低減を図る．

電力スーパフレーム構造を適用する[(7),(8)]．スーパフレームとは，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．基本的時間単位となるビーコン間隔（BI：Beacon Interval）は，アクティブ期間（AP：Active Period）とスリープ期間（SP：Sleep Period）に分割され，APは実質的な通信期間として運用される一方で，SPでは各無線機はスリープ状態に入ることができる．省電力動作を実現するために，ビーコン信号は毎スーパフレームで送信されるのではなく，原則的に同期が必要な場合にのみ送信される．また，図のようにAPは，データフレームより短い期間となる場合があり，データフレームの終了はAP内に制限されず，次のスーパ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APを短縮化することが可能となる．すなわち，各端

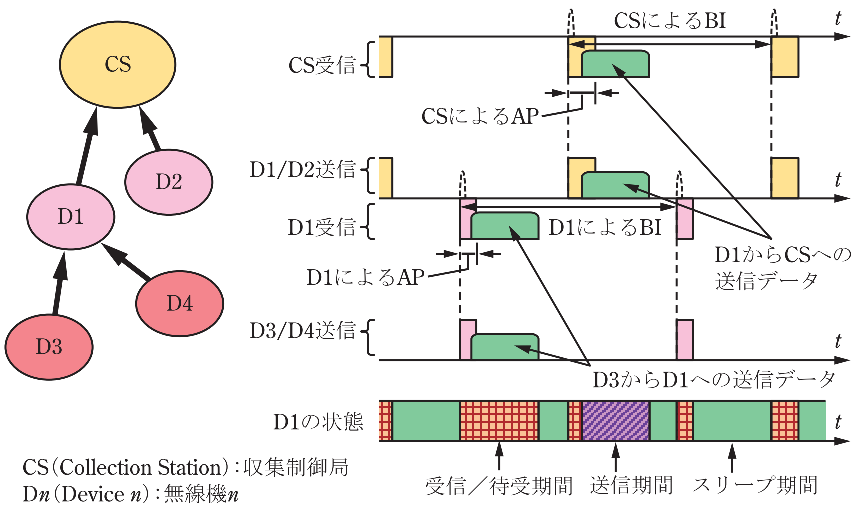


図 3　省電力マルチホップ通信の動作例　収集制御局を根とするトリー構造において，各無線機が省電力スーパフレームを規定し，多段中継によるデータフレームの収集を実現している．

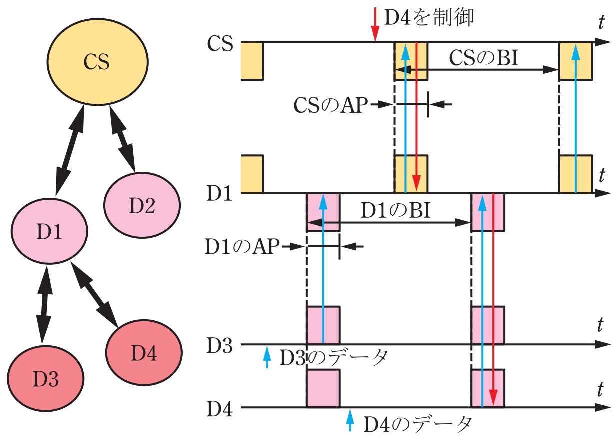
末によるデータフレームの送受信の開始，及び待機のための受信状態は AP においてのみ行われ，SP では AP から継続するデータフレーム送受信に関わる無線機以外はスリープ状態に入ることができるため，消費電力の低減が図られる．

3.2　マルチホップ通信の概念

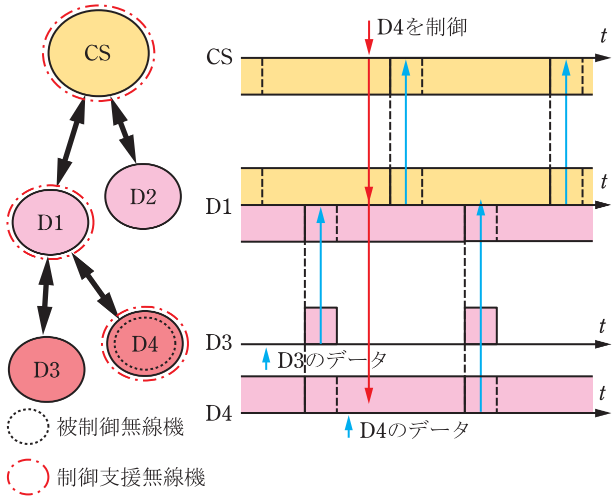
図 3 に，SUN において前提とされるパーソナルエリアネットワーク（PAN：Personal Area Network）のトポロジーにおいて，前節で述べた省電力 MAC 方式を用いてマルチホップ通信を実現する動作例を示す．PAN は，IEEE 802.15.4 規格[8]によって規定される無線端末ネットワークであり，最初に起動され PAN 設立を宣言する PAN コーディネータと呼ばれる無線機と，それ以降に起動され，PAN に対して加入手続きであるアソシエーションを行う無線機によって構成される．アソシエーションを行う無線機と，アソシエーションを受理する無線機の関係に注目すると，PAN コーディネータを根とするトリー構造の PAN トポロジーを見いだすことができる．本稿では，このようなトリー構造を利用し，PAN コーディネータを収集制御局（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 の無線機が D1 へとデータフレームを送信する場合には D1 の規定するスーパフレームに従い，対して D1 が CS に送信する場合には CS のスーパフレームに従って送信していることが確認できる．

3.3　低遅延通信の概念

省電力動作の原理が，SP の導入による間欠的な待受けである一方で，ワイヤレスグリッドの動作形態とし



（a）従来の動作例



（b）低遅延通信を考慮した動作例

図 4　低遅延通信の動作例　（a）は従来の動作を示していて，収集制御局から無線機へのデータ伝送は SP による遅延の影響を受ける．（b）は低遅延通信の動作例であり，被制御無線機，制御支援無線機を定義し SP を調整することで遅延の影響を回避することができる．

て，無線機に接続される機器としてセンサ等を想定し，主に各無線機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，無線機に接続される機器としてアクチュエータ等を想定し，収集制御局から各無線機へのデータ伝送を行う制御動作も含められると考えられる．そのような制御動作については，SP 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．そこで本稿では，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する．図 4 に，低遅延通信の動作例を示す．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無線機を被制御無線機，また収集制御局から，当該被制御無線機までのマルチホップ通信経路に存する無線機を制御支援無線機と定義し，被制御無線機，及び，制御支援無線機については，制御動作のためのデータ伝送を扱うことから，SP 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 4 は，最も明快な例で，被制御無線機，及び，制御支援無線機はいずれも SP を適用しない動作例を示している．

4. システム評価

本章では，提案方式の基本動作特性評価について述べる．

4.1 省電力動作性能

前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を行った．表 1 に考慮したパラメータを示す．また試算結果を図 5 に示す．図から，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分かった．

4.2 データ伝送特性

本節では，提案する省電力マルチホップ通信を実現する無線モジュールを組み込んだ無線機を用いて，前節にて述べた低遅延通信の動作評価について述べる．評価において用いた無線モジュールを図 6 に示す．また本モジュールの諸元を表 2 に示す．本モジュールは，多様な利用形態を想定した上での FEC（Forward Error Con-

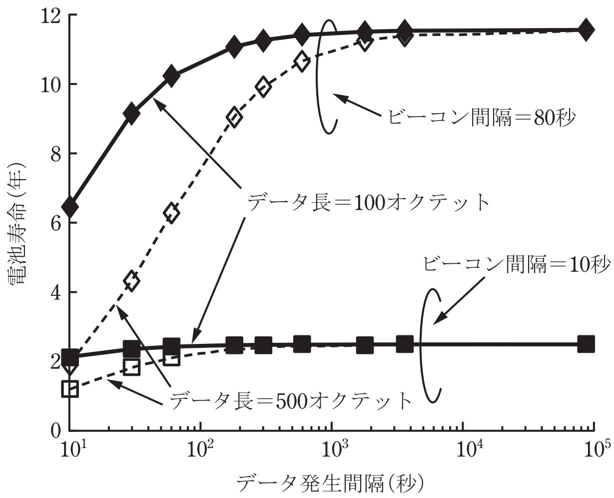


図 5　電池寿命試算結果　ビーコン間隔が 80 秒，データ長が 100 オクテットとした場合で，データ発生間隔が 1 分程度の場合に，10 年以上の電池寿命を期待できることが分かった．

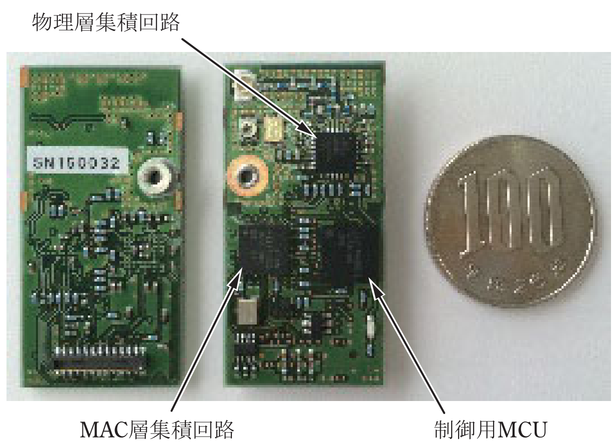


図 6　無線モジュール　それぞれ集積化された物理層回路，MAC 層回路，制御用の MCU により構成される．本モジュールの組込みにより，利用環境に準ずる多様な無線機構成が可能となる．

表 1　電池寿命試算のためのパラメータ

パラメータ	値
伝送速度	100 kbit/s
SD 長	0.1 s
入力電圧	3.3 V
送信時電流	63 mA
受信／待受時電流	43 mA
スリープ時電流	0.02 mA
ビーコン送信周期	10×BI
電池容量	単 3 形乾電池 3 本

表 2　無線モジュール諸元

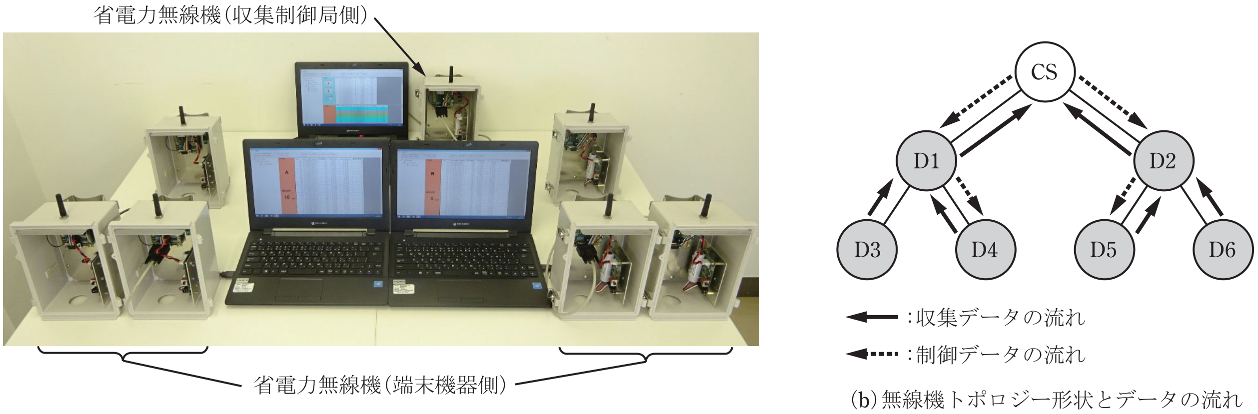
諸元	値
サイズ	20 mm×40 mm×3 mm
重量	4 g
周波数帯	920.6～928.0 MHz
送信電力	20 mW
変調方式	2GFSK
データレート	50，100，200 kbit/s
消費電流	送信時：63 mA 受信／待受時：43 mA スリープ時：0.02 mA
入出力インタフェース	シリアル

trol：前方誤り訂正）等，付加的機能まで含めた上で，物理層・MAC 層集積回路，及び制御用 MCU（Micro Controller Unit：組込み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．当該無線モジュールは，スマートメータへの組込みのみならず，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（Universal Serial Bus）端子を具備したプラグイン型の小形無線機等，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．

本モジュールを用いた低遅延通信の動作評価試験について，概要を図 7 に，結果を表 3 にそれぞれ示す．表 3 は，図 7（b）における無線機 D4，D5 に対する CS からのデータ伝送について，遅延時間の特性をまとめたものである，図 7（b）では，各無線機は BI を 10 秒とするマルチホップ通信トポロジーを構成しているが，端末 D5，D2 はそれぞれ被制御無線機，制御支援無線機として設定され，SP を導入しない動作を行うものとした．

表 3　無線モジュール諸元

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^2
D4（低遅延動作なし）	15.15 s	16.87 s^2



（a）評価試験系外観　（b）無線機トポロジー形状とデータの流れ

図 7　低遅延通信の動作評価試験概要　（a）は，図 6 の無線モジュールを組み込んだ無線機 7 台による評価試験系外観を示す．（b）は，各無線機によるトポロジー形状，及び動作評価試験にて想定する収集データ，制御データの流れを示す．

（a）実験棟内実証　（b）圃場実証

図 8　農業分野への適用実証例　（a）は図 6 の無線モジュールを組み込んだ無線機による実験棟内部の実験用圃場における実証，（b）は屋外圃場における実証の例を示す．

その結果，表3のとおり，低遅延動作を行わない場合にはSP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分かった．

5. 実　証　報　告

最後に，提案方式の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[9]．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，更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前述の無線機を接続し，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8に，実験棟内部の実験用圃場と，屋外の実際の圃場において行われた本実証を示す．今後，屋外圃場の更なる広域化を予定している．

6. お　わ　り　に

本稿では，ワイヤレスグリッド構造の一形態として，スリープ期間を活用し端末同士で通信の中継を行う，省電力マルチホップ通信方式のSUNにおける適用と実証について述べた．本方式が用いる省電力スーパフレームにより，単3形乾電池3本程度で10年以上の動作が可能であることを示した．更に，農業分野における水管理業務への提案方式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の両立動作を実証した．想定トラヒックや，他システムとの共存等を考慮した仕様最適化が今後の課題として挙げられる．

謝辞　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．

文　献

（1） ITU-R, “IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” ITU-R Rec. M. 2083-0, 2015.
（2） IEEE802.15.4g, “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.
（3） Y. Rachlin, R. Negi, and P. Khosla, “Sensing capacity for discrete sensor network applications,” Conf. Rec. 2005 IEEE Information Processing in Sensor Networks, no. 17, pp. 126-132, 2005.
（4） J.L. Hill and D.E. Culler, “Mica : A wireless platform for deeply embedded networks,” IEEE Micro, vol. 22, no. 6, pp. 12-24, 2002.
（5） W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks,” Conf. Rec. 2002 IEEE Computer and Communications Societies（INFOCOM）, pp. 1567-1576, 2002.
（6） A. El-Hoiydi and J.-D. Decotignie, “WiseMAC : An ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks,” Conf. Rec. 2004 International Symposium on Computers and Communications, vol. 1, pp. 244-251, 2004.
（7） IEEE802.15.4e, “Part 15.4 : Low-rate wireless personal area networks（LR-WPANs）, amendment 1 : MAC sublayer,” 2012.
（8） 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.
（9） 中矢哲郎，樽屋啓之，浪平　篤，中田　達，中　達雄，“節水・節電のための圃場と用水機場が連携した灌漑配水システムの試作，” 農業農村工学会誌，vol. 84, no. 10, pp. 19-22, Oct. 2016.

（平成30年1月5日受付　平成30年1月16日最終受付）

児島　史秀（こじま　ふみひで）（正員）
平11阪大大学院通信工学専攻博士後期課程了．同年郵政省通信総合研究所入所．以来，ITS，アドホック通信の研究に従事．現在，国立研究開発法人情報通信研究機構ワイヤレスシステム研究室長．工博．平26産学官連携功労者表彰総務大臣賞受賞．著書「スマートメータシステム」など．