省電力SUNを用いた農業ICT化の取組み

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 ワイヤレスシステム研究室 室長　児島（こじま）　史秀（ふみひで）

1. はじめに

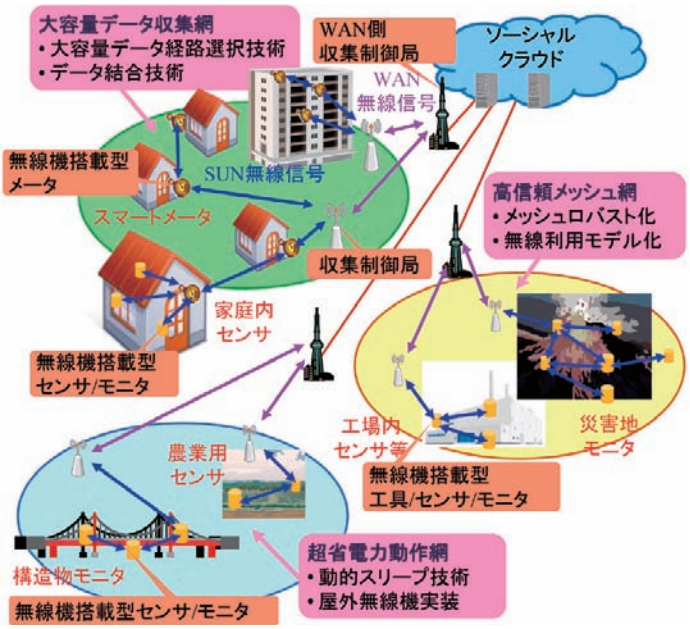
次世代以降の陸上移動通信システム（5G（5th Generation）やB5G（Beyond 5G））の最大の特徴のひとつは、伝送速度等の単一スペックが高度化されるだけではなく、極めて多様化したシステム要求を満足するために、高スループット、高モビリティ、低遅延、大容量、多数接続、省電力等の多様化する高度化要素をヘテロジニアスに具現化していくことが想定されている点である[1]。このため、5G/B5Gの時代には、4G以前とは比較にならないほどの多様なサービスの実現が予想されている。モノ同士の無線通信を想定するInternet of Things（IoT）は、このようなサービスの代表ともいえる。IoTは、無線通信技術がこれまでのようにヒト同士の利用形態から、モノ同士のそれにも解放されたことを明示する概念であり、ヒト同士の際には想定されなかった無線機の動作要件が課される状況を示唆するものである。

IoT分野の無線通信システムの先駆けとも考えられるものが、スマートメータ用の無線通信システムとして標準化されたスマートユーティリティネットワーク（SUN：Smart Utility Network）である[2]。SUNは、無線機を搭載する電気、ガス、水道メータが無線リンクにより、効果的な自動検針、状態管理、制御を実現する無線システムであり、IEEE 802標準化委員会により国際標準化がなされたほか[3]、認証団体であるWi-SUNアライアンスによる社会展開が進行している[4]。

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、このような新しい無線通信分野である IoT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連携して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。特に、前述のSUNシステムの仕様拡張により、スマートメータシステムにとどまらないIoT分野への有効な適用が可能であると考え、中でも人手、労力、経験の不足が時代とともに顕著となっている農業に対するIoT適用について取組んでいる。本稿では、このような農業適用IoTのシステム要件を満足するためのワイヤレスグリッド構造の多様化を検討し、SUNシステムの拡張によるシステム検討と実証を行い、有効性を述べる。

2. SUN拡張によるワイヤレスグリッドの概念

図1に、SUN拡張によるワイヤレスグリッドの概念を示す。



■図1. SUN拡張によるワイヤレスグリッド

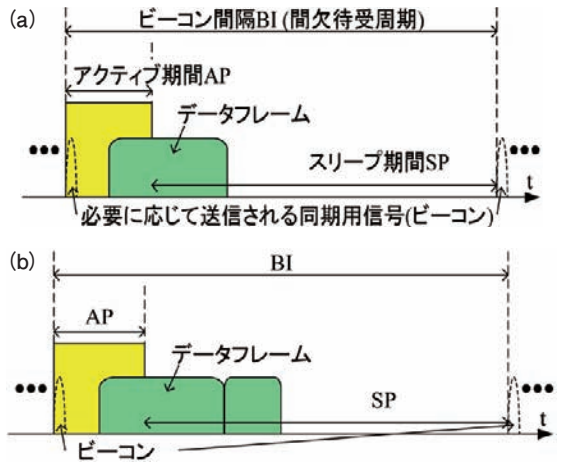
SUNは、無線機を搭載したスマートメータにより形成され、メータ自動検針、制御等を実現する無線システムである。SUNを構成するための技術的要件として、メータに組み込まれ電池駆動となる無線機を想定した省電力動作、さらに、所望サービスエリアを確保するために無線機同士が無線通信リンクを中継するマルチホップ通信等が考えられる。SUNはスマートメータシステムのみならず、センサネットワーク、遠隔監視システム等の多様な用途への有効性が予想される。NICTでは、具体的に3つの多様化形態について示している。すなわち、①特に電力供給が制限されることのない、多数の無線機によるメッシュ状トポロジを特徴とする大容量データ収集網、②電池駆動時等を想定した、低消費電力での動作を特徴とする超省電力動作網、③災害地や工場等、これまで無線通信リンクの適用が想定されていない環境におけるサービスの展開を想定する高信頼メッシュ網である。本稿にて挙げている農業適用IoTに最も関連性が高いのは、超省電力動作網だと考えられる。

3. 農業適用IoTのためのシステム検討

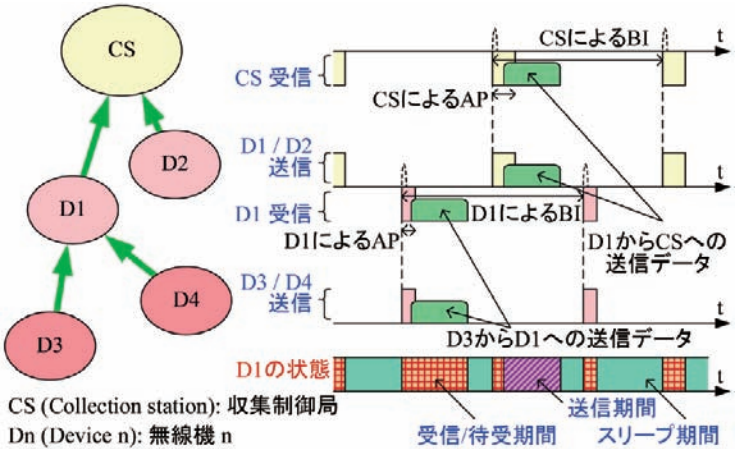
3.1　省電力MAC検討

本動作要件では、スリープ状態を効果的に利用したMAC（Medium Access Control）の導入を検討する。図2に、想定MAC方式の動作例を示す。本方式は、NICTが提案しIEEE 802.15.4eにおいて定義される省電力スーパフレーム構造（図2 (a)）を適用する。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、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2のようにAPは、データフレームより短い期間となる場合を想定する。これにより、データフレーム長に関わらずAPを短縮化することが可能となる。すなわち、各無線機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、消費電力が低減される。本効果は、図2 (b)のようにデータフレーム連結が行われた場合にはより効果的である。

図3に、パーソナルエリアネットワーク（PAN：Personal Area Network）内で各無線機のアソシエーション動作[3]に



■図2.　省電力MACの動作例：(a) 省電力スーパフレーム構造、(b) データフレーム連結が行われた場合

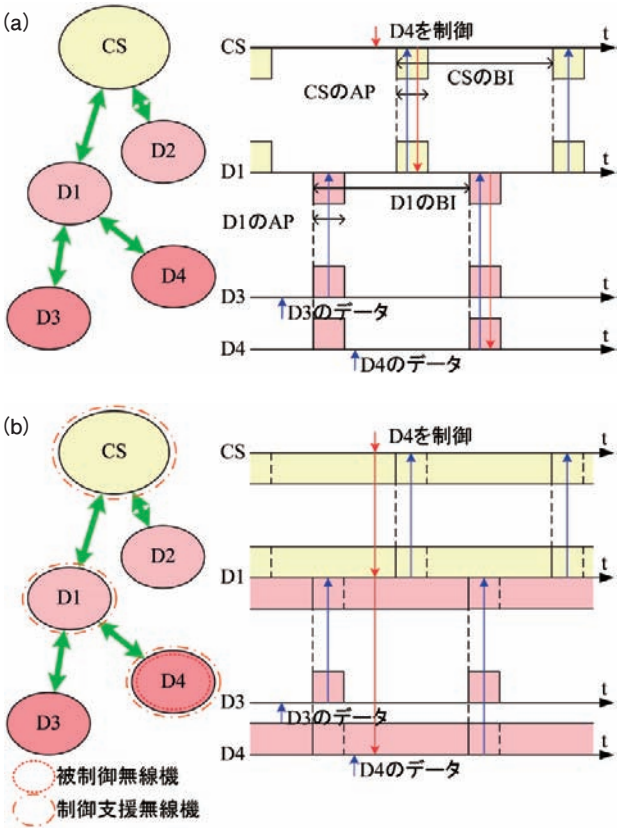


■図3.　省電力マルチホップ通信の動作例

よって構成されたツリー状のトポロジにおいて、前述の省電力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。本稿では、このようなツリー構造を利用し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、D2と同様にCSのスーパフレームに従って送信することが想定される。

3.2　低遅延データ転送動作検討

SPの導入による間欠的な待受けは省電力動作に有効である一方、ワイヤレスグリッドの動作形態として、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考えられる。そのような制御動作については、SPによりもたらされる遅延が深刻となることが予想される。



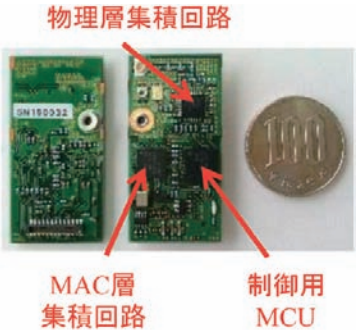
■図4．低遅延データ転送動作の概念：(a) 従来動作、(b) 低遅延データ転送動作

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、低遅延通信対応動作の概念を示す。本動作（**図4 (b)**）では、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 (b)** 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スリープ期間を適用しない動作例を示している。

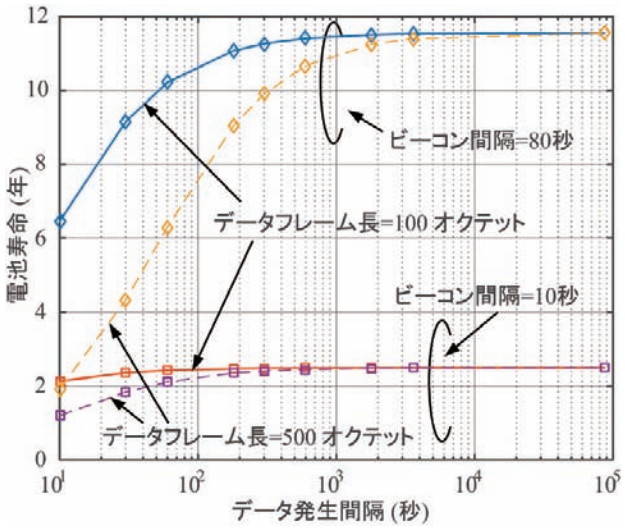
4．評価と実証

4.1　基本特性評価

本節では、前節で述べた省電力MACを具備する無線機実装を想定し、基本特性として電池寿命特性の評価を行う。**図5**に、開発した省電力SUN無線モジュールを示す。本モ



■図5．省電力SUNモジュール



■図6．電池寿命特性

ジュールは、多様な利用形態を想定した上での前方誤り訂正（FEC：Forward Error Correction）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組込型マイクロプロセッサ（MCU：Micro Controller Unit）の4cm×2cm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。

図6に、電池として単三乾電池3本による運用を想定した場合の、図5の省電力SUN無線モジュールの電池寿命特性を示す。データフレーム長を100オクテット、ビーコン間隔を80秒とすると、データ発生間隔が約1分以上の場合に、10年以上の電池寿命が見込まれることが分かった。

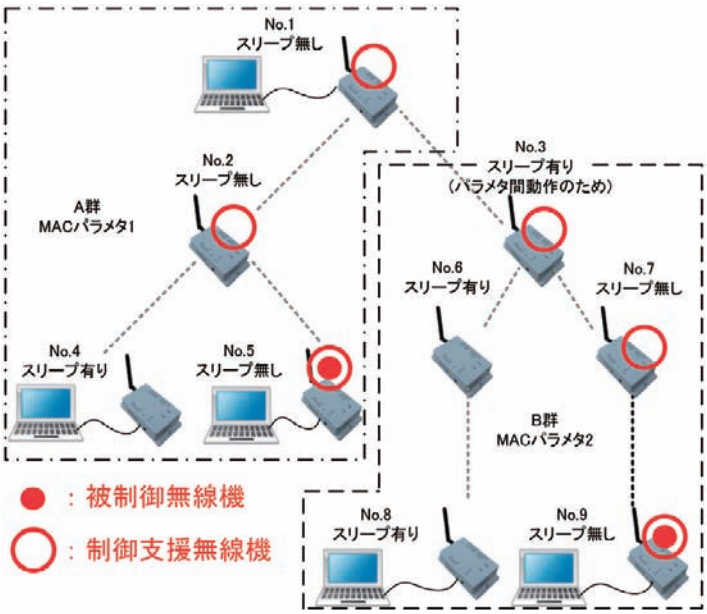
4.2　農業実証

本節では、前節のモジュールを用いたSUN無線機による農業実証について述べる。図7に、図5のモジュールを適用し低遅延データ転送動作実証のために開発した無線機を示す。本実証ではアクチュエータ混在型の無線網適用事例でもある、農業における水管理業務[5]を想定した。このため、本無線機は農業用制御機器への汎用的なインタフェースも実装している。

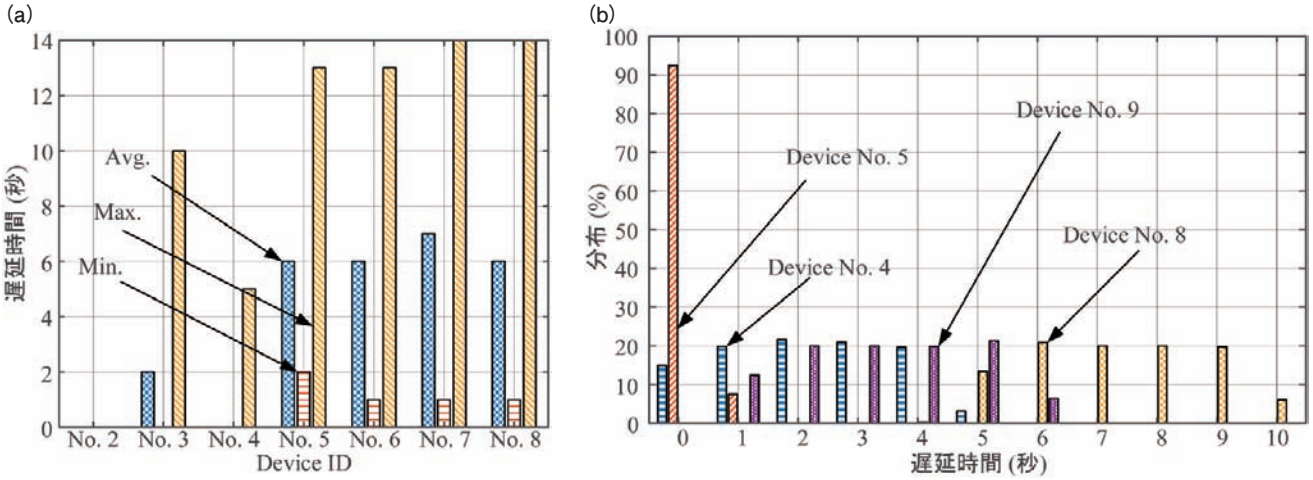
図8に、図7の無線機の低遅延動作評価についての基礎動作試験の概要を示す。本試験では、全9台の無線機で、屋内ワンフロア内でワイヤレスグリッドを構築し、8台の無線機からCS（No.1）への上り方向にあたる省電力センシングデータ収集を行う一方で、収集局4台の無線機（No.4、5、8、9）への下り方向にあたる制御用フレームの伝送実証を行った。結果を図9に示す。図9（b）に示すとおり、制御用フレーム等の下り方向データについては、被制御無線機とされ低遅延データ転送動作に対応したNo.5、No.9の無線機はそれぞれ、同等の中継段数にあり、対応を実装しないNo.4、No.8の無線機に比べて遅延時間が低減されていることが確認できた。

最後に、本動作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。図10に、実際の屋外圃場にて行われた実証時の様子を示す。本実証では、圃場

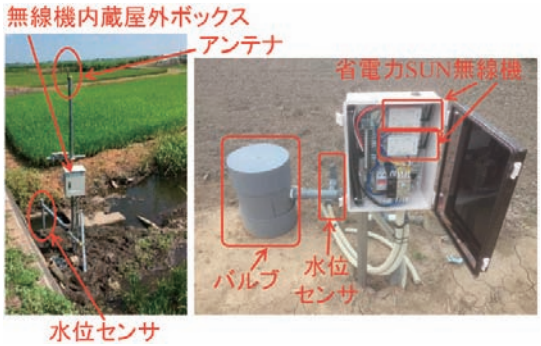
■図7.　低遅延データ転送対応無線機



■図8.　低遅延動作評価のための網構成



■図9. 低遅延動作特性：(a) 上りデータ、(b) 下りデータ



■図10. 圃場水管理業務への適用実証

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。

5. おわりに

本稿では、SUNをその基盤とする無線機の動作形態であるワイヤレスグリッドの、将来のシステム要求に応じた多様化について、大容量データ収集網、超省電力動作網、高信頼メッシュ網の3つの適用形態を提案し、特に、農業適用IoTのための超省電力動作網についてNICTの取組みを述べた。結果、スリープ動作を活用した省電力センシングと、低遅延の制御用フレーム転送動作を適切に共存させる動作を提案すると同時に、実際の屋外圃場における水管理業務への適用実証についても成功裏に行った。ワイヤレスグリッドの国内産業への有益な展開を目的としながら、各適用形態の動作仕様の詳細化、さらにはシステム間共存・協調のための技術の検討が今後の課題として挙げられる。

謝辞

SUNは、現京都大学原田博司教授により、IEEE 802.15.4g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] 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] 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, 2005.

[3] 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.

[4] Wi-SUN alliance, "Wi-SUN alliance," http://www.wi-sun.org/

[5] 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、水土の知、84 (10), pp.19-22, 2016