

## 2-5 ビル内センシング等に有効な大規模メッシュ構築技術の研究開発

児島史秀 ヴェルティナ ラバリジョンナ

本報告では、NICTにより検討されているワイヤレスグリッド構造の一動作形態であり、多数の端末が協調してデータの中継等を行う大容量データ収集網に関する研究開発について述べる。本研究開発では、適切なメッシュ構造の構築と運用を実現するために、国際推奨方法 IEEE 802.15.10にて定義され、冗長性の低い非IPにより、無線パーソナルエリアネットワーク (PAN: Personal Area Network) 内でデータフレームの効率的な経路選択制御を行うレイヤ2経路選択制御 (L2R: Layer 2 Routing) を適用することについて検討した。成果として、複数の無線端末が互いの通信品質を把握しながら自動的にあて先までの中継経路を見つける自律型メッシュ構築機能、データの衝突を減らすデータフレーム結合伝送機能、多様な通信サービスを提供できる無線通信仮想化機能の実装に成功し、屋外実験を含む無線通信実験の実施により動作評価を行った。

### 1 まえがき

NICTの検討テーマのひとつであるワイヤレスグリッド構造の最も典型的な実施形態であるSUNは、当初スマートメータへの適用を前提とされていたが、SUNの応用はスマートメータシステムだけにとどまらないことは容易に予想される [1]-[4]。すなわち、スマートメータ用途においてみられる、低速・小容量の通信と、省電力動作等による長期的な動作という性質をもつのであれば、非常に多様な分野における利活用が予想される。近年、その意義が注目されているIoT (Internet of Things) 分野や、M2M (Machine-to-Machine) 分野も例外ではない。将来の無線通信サービス需要の多様化、すなわちアプリケーションの多様

化に応じて、SUN無線機の適用分野も同様に多様化していくことが予想される。

このような見地による拡張SUNの概念を図1に示す。図1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。本稿では、特に①の大容量データ収集網を想定し、当該形態における効果的な経路選択技術に関する研究開発について述べる。

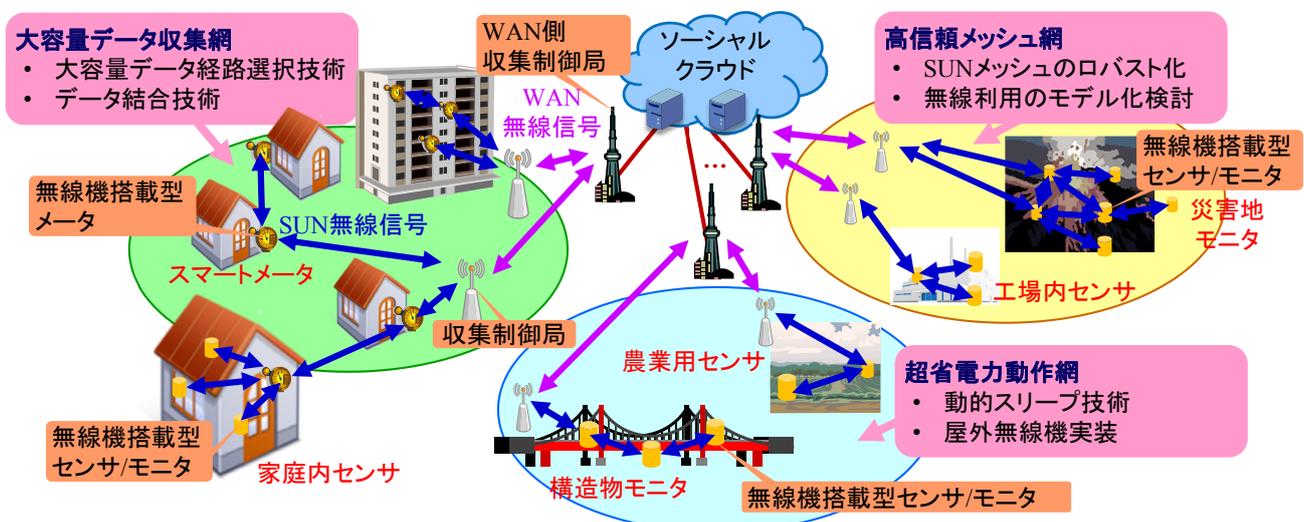


図1 拡張SUNの概念

## 2 レイヤ2 経路選択制御の検討

### 2.1 レイヤ2 経路選択制御の原理

本検討における経路選択制御技術の最大の特徴は、本制御に必要な端末間情報交換等の動作を、パーソナルエリアネットワーク [5] におけるレイヤ2の呼称で知られる MAC 層の制御で行う点である。そのため、取り扱う情報は、MAC 層において扱う情報の単位である情報要素 (IE : Information Element) で記述され、MAC 層の機能によって交換され、処理される。これにより、レイヤ3 制御である IP (Internet Protocol) により処理される従来の経路選択制御に比べて、冗長分が少なく、簡易な処理が可能になると考えられる [6]-[8]。

次節より、本検討にて研究開発・実証を行ったレイヤ2 経路選択制御のうち、主要な技術について述べる。

### 2.2 自律型メッシュ構築機能

本機能は、メッシュ構造を構成する各無線機が、自身の情報を含むメッシュ構築用信号 (自分がほかのどの無線機とつながっているか等) をそれぞれ定期的に発信し、かつ、ほかの無線機から同じ信号を受信することで、全体のメッシュ構造の感知を可能とするものである。最初のメッシュ構築用信号を発信する無線機はメッシュルートと呼ばれ、ほかの無線機からの当該信号は、メッシュルートの信号を基準として構成される。

図2に、時間経過に伴うメッシュ構築用信号によるメッシュルート R への経路構築の動作例を示す。図2 (i) では、メッシュを構築しようとするメッシュルート無線機により、R のあて先データ等を含んだ最初のメッシュ構築用信号が発信され、それらが、ほかの無線機 A、B に受信されている。これにより A、B はメッシュの存在を検知し、同時に、近傍に R が存在する

ことも検知する。さらに、受信したメッシュ構築用信号に基づき、R との間の通信品質についても知ることができる。

次に、A、B は R をはじめ、ほかの無線機にも同様の情報を与える目的で、メッシュルート構築用信号を発信する (図2 (ii) 参照)。これを受信した無線機 C、D も同様の手順を実施する (図2 (iii) 参照)。最終的に、R、A、B、C、D の5つの無線機でメッシュを構築し、かつ、それぞれの無線機が、近傍無線機、到達可能な無線機、それぞれの無線機間の通信品質を知ることになり、図2 (iv) のように特定の無線機をあて先とする適切な中継経路を確立することができる

### 2.3 データフレーム結合機能

本機能は、あて先が同じ複数のデータフレームを各無線機で結合し、1つのデータフレームとして次の無線機に中継することで、データフレームの数を減少させ、閉塞と衝突の低減により、データ収集の性能劣化を防ぐものである。

図3に、データフレーム結合機能の動作例を示す。ここでは、図2と同じメッシュにおいて、メッシュルート R 以外の無線機 A、B、C、D がそれぞれ R にあてたデータフレームを発生し、そのフレームが図2 (iv) の経路により、中継される状況を示す。通常であれば、各無線機からの4つのデータフレームがほぼ同時に R に到来し、その際にフレーム同士の衝突が発生し、R 側でそれぞれを正常に受信できない場合が生じる。

一方で、図3のようなデータフレーム結合機能では、あて先を同じとするデータフレームを結合して、1つのデータフレームとして中継することにより、この例では、結果的に R に到来するのは4つのデータフレームが結合された1つのデータフレームであり、前述のような衝突による性能劣化を回避することができる。

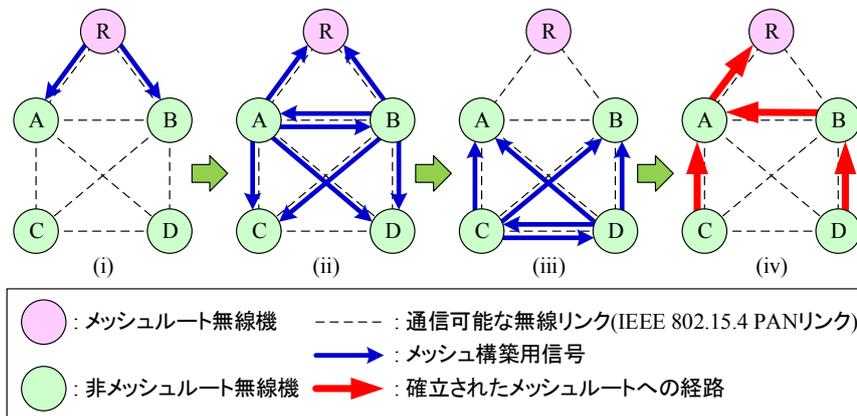


図2 自律型メッシュ構築機能

## 2.4 無線通信仮想化機能

本機能は、想定するアプリケーションに応じて、データフレームの差別化を行い、それぞれに適切な処理（メッシュルートへの経路の構築と選択）を各無線機で行う機能である。

図4に、無線通信仮想化機能の動作例を示す。本機能では、2つのメッシュルート無線機R1、R2により、それぞれメッシュが構成され、それぞれが異なるサービスを提供する状況を示している。この場合、A、B、C、Dの無線機は、同時にそれら2つのメッシュに参加することができ、それぞれのメッシュにおける経路に従って、それぞれのサービスに関するデータフレームが中継されることになる。

## 3 レイヤ2経路選択制御の実証

### 3.1 宅内エネルギー管理システムへの適用実証

本章では、NICTにおけるレイヤ2経路選択制御の実証例について述べる。

図5は、家庭内のエネルギー消費形態を管理するための、宅内エネルギー管理システム（HEMS：Home Energy Management System）のシステム概念である。HEMSは、HEMSコントローラがスマートメータ、

各種家電とECHONET Lite [9][10]という上位層通信プロトコルで接続し、消費電力の見える化や家電からのデータ収集、家電の制御等まで行うシステムであるが、このうちHEMSコントローラとスマートメータ間の接続であるBルート、HEMSコントローラと各家電との接続であるHAN（Home Energy Network）をそれぞれSUN無線リンクにより実装することが考えられている。図6は、HANを実現するための無線機適用実証例を示す。

### 3.2 評価用装置の開発

2で述べたレイヤ2経路選択制御機能の包括的な評価を行う目的で、評価用装置の開発を行った。図7に評価用装置の外観を示す。本検討では、メッシュルートの機能を有する端末2台と、非メッシュルート端末10台により構成されるPANにおいて、前述のMAC層制御によるメッシュ構造の構築及び運用の動作特性評価を行った。図8に当該経路選択制御機能のうち、無線通信仮想化機能の動作表示例を示す。本動作では、同一PANの内部で、2台のメッシュルートによりそれぞれ異なる図2のようなレイヤ2メッシュ構造が構築されている様子が図示されている。また、一部の端

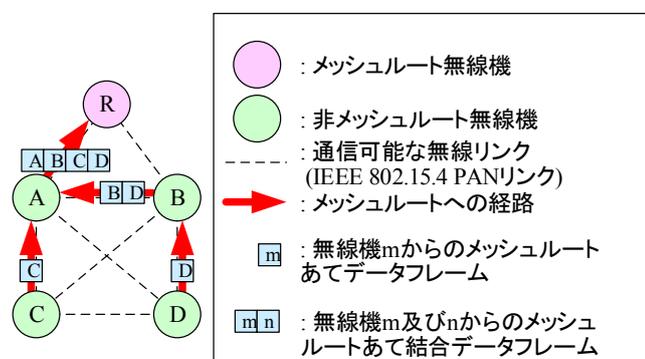


図3 データフレーム結合機能

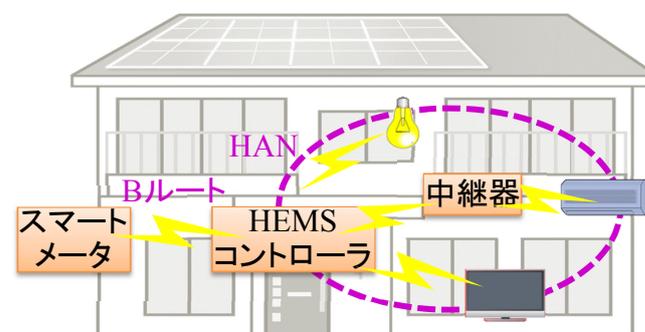


図5 HEMSのシステム概念

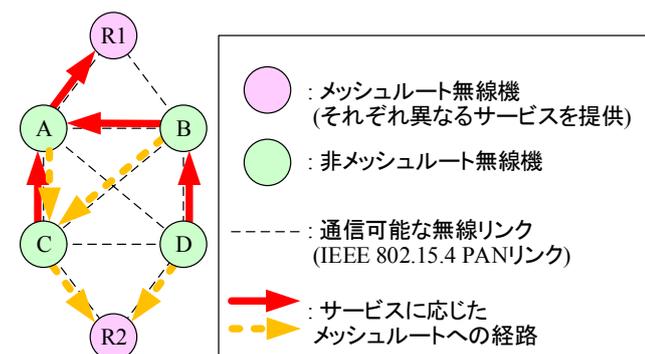


図4 無線通信仮想化機能



図6 HAN実現のための無線機適用実証例

## 2 地上通信技術の研究開発

末(B、C、F、G、I、J)については、いずれのメッシュルートが定義するメッシュ構造にも参加していて、双方の経路選択に寄与していることが図8よりわかる。

### 3.3 評価試験の実施

レイヤ2 経路選択制御機能の評価を行うため、前節の評価装置を用いて屋内及び屋外におけるデータ収集試験を行った。試験はNICTワイヤレスネットワーク総合研究センター(神奈川県横須賀市)周辺にて実施された。図9に、無線通信仮想化機能の動作特性評価を行うための、2つのメッシュ構造の配置図をそれぞれ図9(a)、(b)として示す。また結果を表1に示す。本試験では、図9中のA~Jの10端末から、同R1、R2の2台のルートメッシュ端末(それぞれ、メッシュ1、メッシュ2を構築)へのデータ収集動作を行った。結果、表1に示すとおり、いずれのメッシュにおいても90%以上のデータ収集成功率を実現できたことがわかった。

## 4 あとがき

本報告では、ワイヤレスグリッド構造の一動作形態として、多数の端末が協調してデータの中継等を行う大容量データ収集網に関する研究開発について述べた。本研究開発では、L2R技術の適用により、無線メッシュ構造を適切に構築・運用することについて検討し、

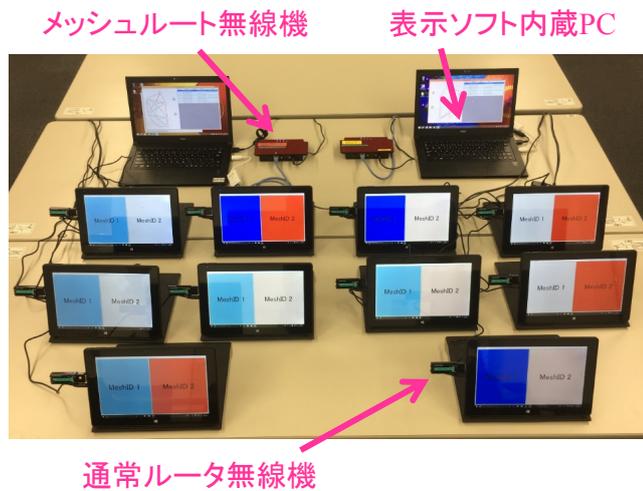


図7 レイヤ2 経路選択制御評価用装置

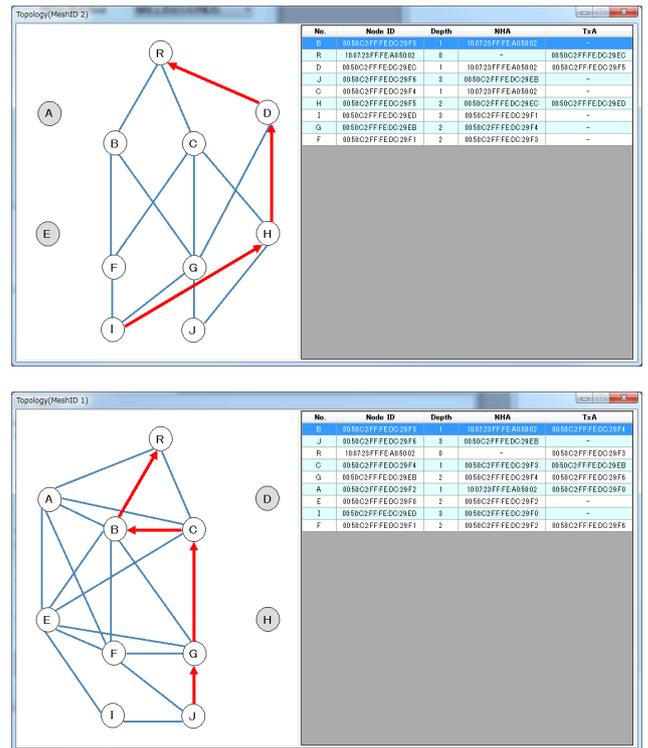


図8 無線通信仮想化機能の動作表示例

表1 無線通信仮想化機能の屋外動作評価実験結果

	メッシュ 1	メッシュ 2
データ収集成功率	91 %	95 %

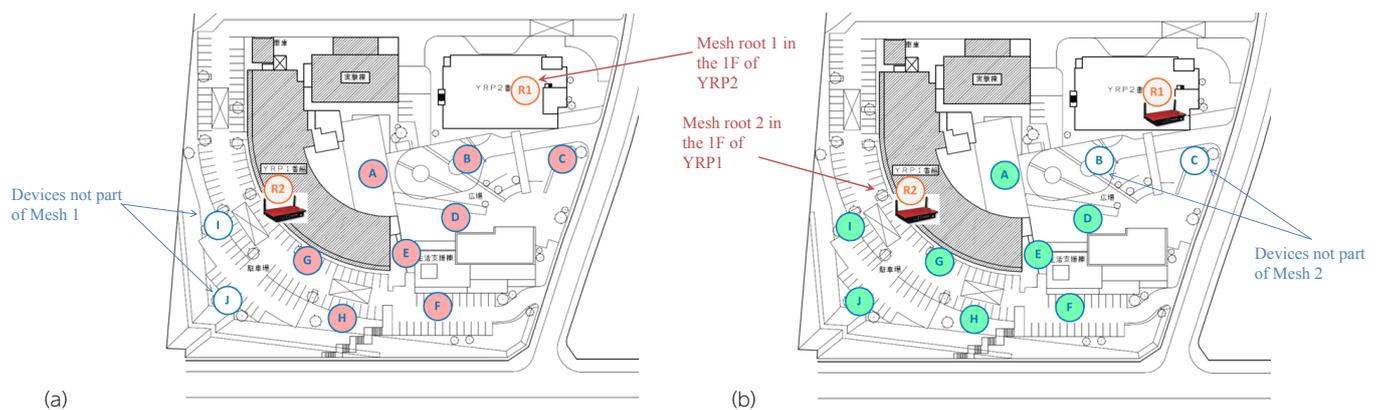


図9 無線通信仮想化機能の屋外動作評価実験

自律型メッシュ構築機能、データフレーム結合伝送機能、無線通信仮想化機能の実装及び動作評価を行った。将来予想されるアプリケーションの多様化に応じた、L2 R 技術の更なる高度化が今後の検討課題として挙げられる。

## 謝辞

IEEE 802.15.10 推奨方法は、NICT ヴェルティナ・ラバリジョンナ研究員(当時)、現京都大学原田博司教授により標準化された [6][7]。また、本報告における評価試験は、同研究員により実施された。さらに、SUN は、同教授により、IEEE 802.15.4 g [4] 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 [9] の設立を通じて社会展開が推進されている。

## 【参考文献】

- 1 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.
- 2 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.
- 3 Q. Li, J. A. Aslam, and D. Rus, "Online power-aware routing in wireless ad-hoc networks," in Conf. Rec. 2001 MOBICOM, pp.97–107.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 IEEE 802.15.10, "IEEE Recommended Practice for Routing Packets in IEEE 802.15.4 Dynamically Changing Wireless Networks," 2017.
- 7 Verotiana Rabarjaona, Fumihide Kojima, Hiroshi Harada, and Clint Powell, "Enabling Layer 2 Routing in IEEE std 802.15.4 Networks with IEEE Std 802.15.10," IEEE Communications Standards Magazine, vol.1, no.1. pp.44–49, March 2017
- 8 Verotiana Rabarjaona, Fumihide Kojima, and Hiroshi Harada, "Hierarchical Mesh Routing Implementation for Indoor Data Collection," IEEE 27 th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC'16 ), Valencia, Spain, Sept. 2016
- 9 Wi-SUN alliance, "Wi-SUN alliance," <http://www.wi-sun.org/>
- 10 ECHONET CONSORTIUM, "ECHONET Lite Specification ver. 1.00," 2012.

## ヴェルティナ ラバリジョンナ

元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  
有期研究員  
博士(工学)  
無線経路選択制御、無線アクセス制御



**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