

# スマートメータ向け 無線メッシュネットワーク技術

石橋孝一\* 城倉義彦\*\*  
八木章好\*  
阿部充伸\*

Wireless Mesh Network Technology for Smart Meter Networks

Koichi Ishibashi, Akiyoshi Yagi, Mitsunobu Abe, Yoshihiko Shirokura

## 要 旨

地球温暖化防止に向けた太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの大量導入に備えて、電力系統の安定性を維持するためスマートグリッド及びスマートメータが検討されてきた。特に、国内では、2011年3月11日の東日本大震災以降、電力需給が厳しくなり、節電要請が広く行われる中、情報通信技術によって電力需給制御をスマートに実施可能なスマートメータシステムに対する期待が高まっており、スマートメータの導入加速も示されている。

三菱電機でも、スマートメータネットワークの実現に向けた技術開発を強化しており、本稿では、スマートメータネットワークの実現に向けて有力な通信方式である無線メッシュネットワーク技術について述べる。なお、スマートメータネットワークについては大規模化や安定性向上が求められており、次に示す対策が必要である。

### (1) 伝送品質の向上

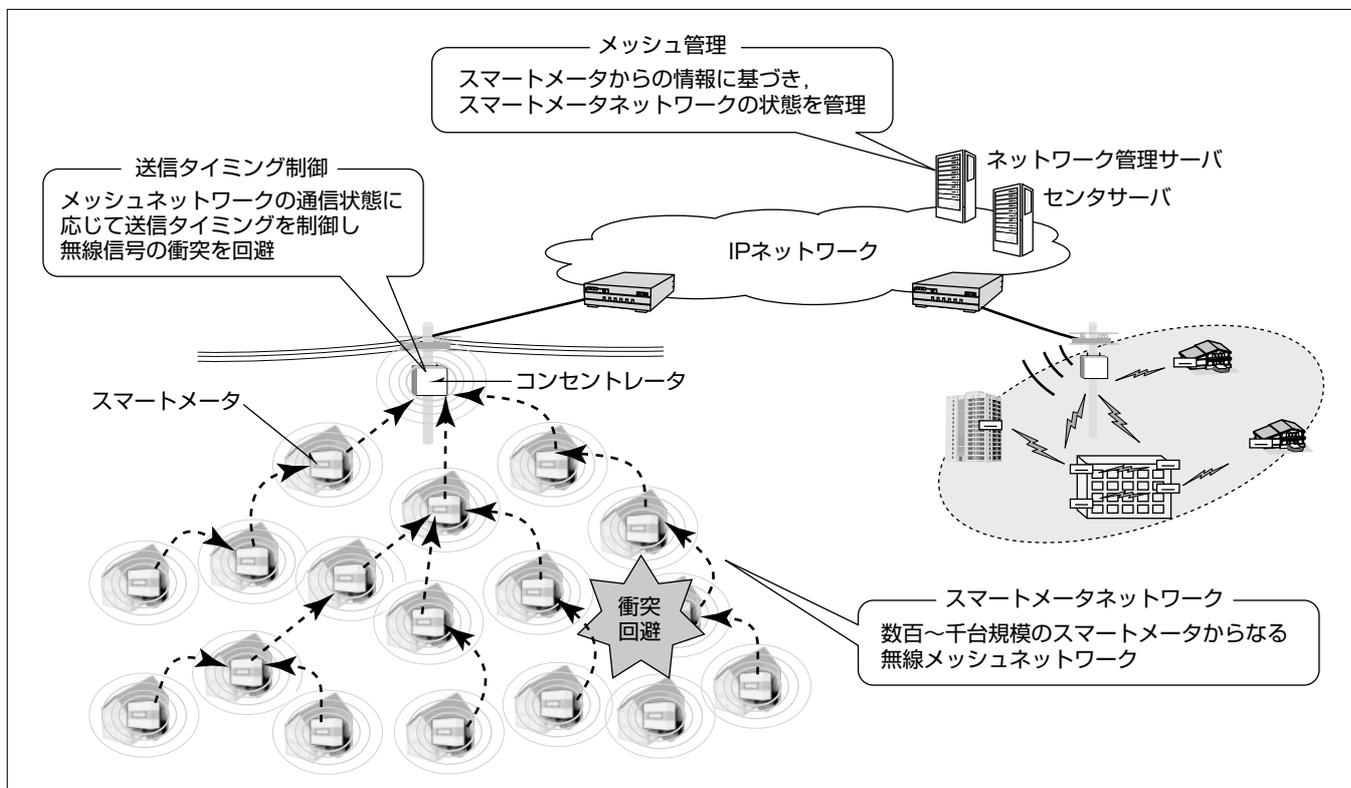
無線伝搬変動を考慮し経路構築時に安定した無線リンクを選択することによって、ネットワーク内での伝送品質の向上を実現

### (2) ネットワーク上でのパケット衝突の回避

ネットワークのトポロジー情報などにに基づき実施するコンセンレータによる送信タイミング制御やネットワーク構築時の端末参入手順の改良によって、パケット衝突の頻度を大幅に削減

### (3) 安定した運用

スマートメータの持つ経路情報や無線状態等をネットワーク管理情報として効率的に収集することによって、ネットワークの安定運用を実現



## 無線メッシュネットワーク技術によるスマートメータシステム

スマートメータからの情報を収集するとともに、個々のスマートメータに対する情報通知や制御を実現するためのスマートメータシステムである。各需要家に設置されるスマートメータ間を接続するために無線メッシュネットワーク技術を適用している。

## 1. ま え が き

近年の無線テクノロジーや電子デバイスの進展に伴い、固定的な通信インフラを必要とせず、無線ノードによってネットワークを構築できるマルチホップネットワーク又はメッシュネットワークと呼ばれる無線メッシュネットワーク(以下“メッシュネットワーク”という。)が注目されている。メッシュネットワークは、無線通信機能を持つノードによって構成されるネットワークであり、必要とするエリアに必要とするタイミングで任意に構築可能な自律分散型のネットワークである。メッシュネットワークの実現に向けては、想定する適用シナリオや種々の制約条件のもとで様々な経路制御プロトコルが提案されてきている。

一方、低炭素社会の実現に向けてスマートグリッドやスマートメータへの取組みが国内外で加速されている。特に、国内では、2011年3月11日の東日本大震災以降、電力需給が厳しくなり、節電要請が広く行われる中、情報通信技術によって電力需給制御をスマートに実施可能なスマートメータシステムに対する期待が高まっており、スマートメータの導入加速も示されている<sup>(1)</sup>。

本稿では、各需要家に設置されるスマートメータ間を接続するスマートメータネットワークの実現に向けて、有力な通信方式であるメッシュネットワーク技術について述べる。

## 2. スマートメータネットワーク

スマートメータネットワークは、各家庭に設置されるスマートメータ間を接続し、スマートメータからの情報を収集するとともに、個々のスマートメータに対する情報通知や制御を実現するためのネットワークであり、低コストかつ短時間で構築可能なシステムであることが求められる。また、スマートメータについては各家庭に設置されることから、通信部分については、その消費電力が十分に小さいことが求められる。これらに対して、無線メッシュネットワーク技術を用いた無線センサネットワークの一形態として、スマートメータネットワークへの適用が検討されている<sup>(2)</sup>。

図1にメッシュネットワーク技術を適用した際のスマートメータシステムを示す。メッシュネットワーク技術を適用した数百台規模の無線ノード(スマートメータ)によって、スマートメータネットワークが構成される。スマートメータネットワークは、ゲートウェイ機能を持つ特定の無線ノード(以下“コンセントレータ”という。)によって、IPネットワークを介してセンタサーバに接続され、複数のスマートメータネットワークとセンタサーバによって、スマートメータシステムが構成される。

ここで、スマートメータシステムが実現すべき基本的な

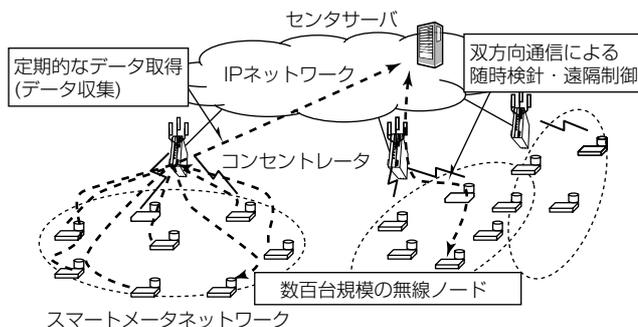


図1. スマートメータシステム

機能は、①コンセントレータを介したスマートメータが持つ検針データの定期的な取得(データ収集機能)、②指定したスマートメータに対する制御メッセージの通知による随時検針や遠隔制御(制御機能)、及び③スマートメータ(通信部)のファームウェアの更新(配信機能)であり、従来のメッシュネットワークに対して、次の要求条件がある。

### (1) スケーラビリティ

スマートメータネットワークあたり数百台規模のスマートメータの収容

### (2) 自動構成

スマートメータ設置時の識別子やパラメータ等の手動設定の回避

### (3) 安定した運用

無線環境の変化によらないサービスの継続性

### (4) 多様なサービスへの対応

定期的なデータ収集に加えて、センタサーバからの監視・制御のサポート

### (5) セキュリティ

課金情報に対する認証や改ざん防止

### (6) 省消費電力

配電ロス低減に向けた省消費電力

## 3. メッシュネットワーク技術

メッシュネットワークの実現に向けては各所で研究開発が行われている。この章では、最初にメッシュネットワークを実現するための経路制御プロトコルについて述べ、スマートメータネットワークへの適用に向けた議論を行う。

### 3.1 メッシュネットワーク向け経路制御プロトコル

メッシュネットワークを構築するための経路制御プロトコルについては古くから研究開発が行われており、軍用途への適用や環境モニタリング等の多様なアプリケーションに対して、多種多様な提案がなされている。図2は代表的な経路制御プロトコルを示しており、On-demand(Reactive)型、Proactive型、階層型、位置情報利用型プロトコル等がある。

On-demand型プロトコルは、各無線ノードがデータ転送の開始時に経路を確立する方式であり、一般に、“フラッ

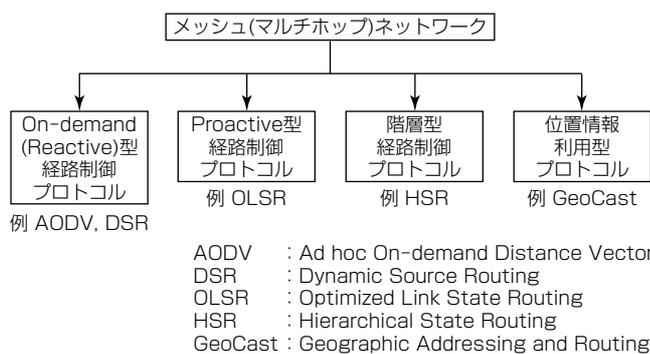


図2. メッシュネットワーク向け経路制御プロトコル

ディング”と呼ばれる手法によって、送信先ノードに対する経路探索を実施する。このフラッディングに基づく経路探索では、ネットワーク内の全無線ノードに制御情報を伝播する必要があり、スケラビリティの確保に向けては大きな課題となる。

Proactive型プロトコルは、近接ノードとの間で定期的にメッセージを交換し、自身の持つ経路情報を更新する方式であり、ネットワークを構成する全ノードに対する経路を常時、保持している。また、経路情報のメンテナンスのため、定期的にメッセージを交換する必要があり、制御トラフィック量が増える傾向にある。そのため、スマートメータネットワークのように数百台規模でのスマートメータの収容を考えると、個々の無線ノード(スマートメータ)で必要となるメモリ量の増大や経路情報のメンテナンスに伴うトラフィック量の増大が課題となる。

階層型プロトコルは、On-demand型とProactive型のプロトコルを組み合わせた方式である。この方式では、ネットワークを階層化することによって、近隣の無線ノードとの通信に対してはProactive型を、階層間の通信に対してはOn-demand型を適用することによって、各プロトコルの短所を補っている。しかし、ネットワークの階層化とその管理が必要であり、継続的にスマートメータが導入されるスマートメータシステムでは、スマートメータの導入の都度、ネットワークの階層化・管理を見直す必要があり、ネットワークの階層化実現が大きな課題となる。

位置情報利用型プロトコルは、無線ノードの位置情報を利用する方式である。この方式では、GPS(Global Positioning System)などによる位置情報の取得が必要であり、低コストが要求されるスマートメータシステムでは、どのようにして各スマートメータの位置情報を取得するかが課題となる。

また、近年では、インターネット技術に基づく無線センサネットワーク実現の研究開発も進められている。例えば、インターネット技術の標準化を議論するIETF(Internet Engineering Task Force)では、工場内のネットワークやホームネットワーク、ビルのオートメーション、市街地の

ネットワーク等の実現に向けて、省電力で不安定な通信環境下で動作する経路制御プロトコルの議論を行っており、IETF ROLL(Routing Over Low power and Lossy networks) WG(Working Group)では、RPL(IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy networks)と呼ばれる経路制御プロトコルが提案されている<sup>(3)</sup>。このプロトコルは、ゲートウェイ機能を持つ代表ノードを根とするツリー型のネットワークを前提とし、On-demand型とProactive型のプロトコルの特徴を併せ持つプロトコルとなっている。

これらに対して、個々の無線ノードにおける低コスト化を目的とし、必要メモリ量の削減を可能とするメッシュネットワーク技術を開発した。開発したメッシュネットワーク技術は、RPLと同様にコンセントレータを根とするツリー型のネットワークを前提としたプロトコルであり、通信エラー発生時に絞ってOn-demand型プロトコルに従い経路探索を実施することによる制御トラフィック量の削減や、狭帯域～広帯域な無線媒体によらず適用可能であることを特長としている。また、シンプルな通信プロトコルとすることによって、ソフトウェアのプログラムサイズを抑えて、組み込み型CPUでの実装を実現している。

### 3.2 スマートメータネットワークへの適用

2章で述べたように、スマートメータネットワークでは、特有の要求条件があり、幾つかの課題がある。次に課題を示すとともに、開発したスマートメータ向けメッシュネットワーク技術での対応を述べる。

#### 3.2.1 伝送品質の向上

無線リンクでは電波の受信状態によって通信性能が変動し、一般に、有線リンクに比べて高いパケット・エラー率となる。また、途中の中継ノードを介して通信を行うマルチホップ型のスマートメータネットワークでは、無線リンクにおけるパケット・エラー率の要因に加えて、送信先ノードに向けた複数回のパケット転送に伴うメッセージの到達率低下を考える必要がある。

これに対して、①受信電波強度や無線リンクの信頼性を考慮することによる経路構築時の安定した経路の確保や②MAC(Media Access Control)レベル及びスマートメータネットワーク内での再送制御による無線伝搬変動への対応によって、スマートメータネットワーク内での伝送品質の向上を図った(図3)。

#### 3.2.2 ネットワーク上でのパケット衝突の回避

無線ネットワークでは、隠れ端末問題などによるパケット衝突の考慮が必要である。特に、スマートメータネットワークでは、コンセントレータに向けて各スマートメータがパケットを送信するため、コンセントレータ周辺で通信が混み合い、パケットの衝突発生確率が増大する。このパケット衝突は、狭帯域の無線媒体を用いる時には顕著となる。

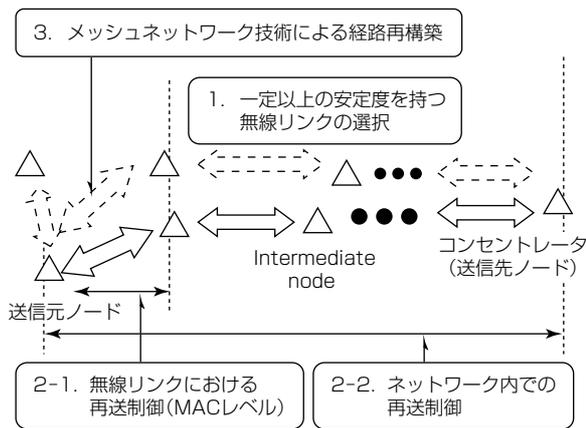


図 3. 伝送品質の低下に対する対応

これらには、コンセンレータによる送信タイミング制御によって、ネットワーク上でのパケット衝突を回避している。さらに、コンセンレータにおける制御アルゴリズムを改良することによって、パケット衝突の回避を維持しつつ、データ収集に要する時間を短縮するための実現方式の検討を進めた。

また、スマートメータネットワークでは、停電復旧時の動作についても考慮が必要である。すなわち、停電からの復旧時では、数多くのスマートメータが同時に再起動される。そのため、各スマートメータが個々にネットワーク再構築に向けてコンセンレータとの間で経路の再構築を実施する場合、経路探索などに要するパケットによってネットワークの輻輳(ふくそう：パケット衝突の頻発)が発生し、ネットワークの構築に時間を要することになる。

これに対して、停電復旧時や新規設置時のネットワーク構築については、各スマートメータが隣接するスマートメータから情報を取得することによって、コンセンレータ宛の経路を確立し、ネットワーク参入時の負荷の低減を図った(図 4)。

### 3.2.3 安定した運用

無線通信システムでは、一般に、障害物などによる経路の一時的な遮断や新規無線ノードの追加に伴う最適経路の変動、他のシステムからの無線干渉の影響等を考慮する必要がある。また、スマートメータシステムでは、収集する情報は課金情報として利用されるため、無線環境変動による伝送品質低下の影響を最小限とする確実な収集が求められる。

これらに対しては、各スマートメータの持つ経路情報や無線状態等を効率的に収集し、センタサーバでメッシュネットワークの状態を管理する。また、各スマートメータは、コンセンレータに向けた複数の経路、又は(可能であれば)複数のコンセンレータに対する経路を保持し、コンセンレータに対する経路を一時的に利用できない時には別経路で転送することによって、迅速で確実なデータ収集を実現した(経路の冗長化)。

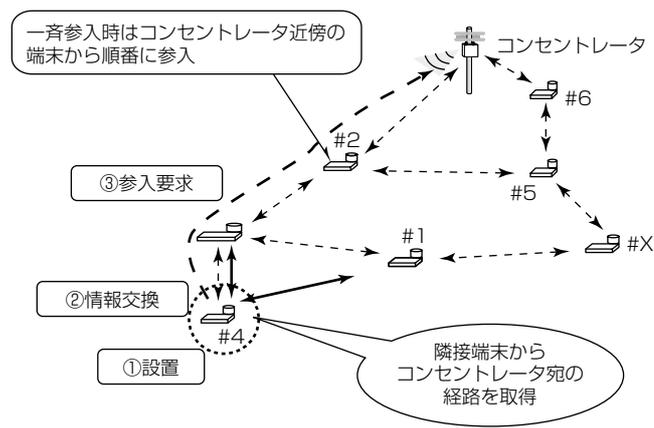


図 4. ネットワークへの参入

## 4. む す び

スマートメータネットワークの実現に向けて、各家庭に設置されるスマートメータの収容(大規模化)や社会インフラとしての安定した運用(安定性)が求められるスマートメータネットワークの実現に向けたメッシュネットワーク技術に関する取組みについて述べた。

現在、当社では、無線特性の評価やネットワークの安定性評価等を目的として、大船地区内に500台規模のスマートメータ向け無線通信ノードからなるメッシュネットワークを構築している。今後は、社内実証実験などを通してメッシュネットワーク運用に向けた技術蓄積を図るとともに、スマートメータを中心とした宅内通信ネットワークへの拡張に向けた技術開発に取り組んでいく。

また、メッシュネットワーク技術については、様々な用途への適用が議論されており、多様な用途への適用に向けた技術開発を展開する。

## 参 考 文 献

- (1) 国家戦略室 エネルギー・環境会議：エネルギー規制・制度改革アクションプラン～グリーン成長に向けた重点28項目の実行～ (2012)  
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/gyoukakuonbu/dai4/siryuu6-3.pdf>
- (2) Isaac, S. J., et al.: A Survey of Wireless Sensor Network Applications from a Power Utility's Distribution Perspective, IEEE Africon2011, 1~5 (2011)
- (3) Winter, T., Ed.: RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks, RFC6550 (2012)  
<http://solomon.ipv6.club.tw/Course/ProtocolEngineering/draft-ietf-roll-rpl-04.pdf>