

低コストで安定したスマートグリッド通信を実現する スマートメータ用無線メッシュネットワーク通信ユニット

Wireless Mesh Network Communication Unit for Smart Meters Enabling Low-Cost and Stable Communication in Smart Grid Systems

米山 清二郎

中野 健治

小林 崇裕

■ YONEYAMA Seijiro

■ NAKANO Kenji

■ KOBAYASHI Takahiro

近年、スマートグリッドの実現を目指した取組みが全世界で行われている。スマートグリッドでは、ICT（情報通信技術）網と電力網を連携させて電力網を信頼性高く効率的に運用するためのキーデバイスとして、スマートメータが重要な機器となる。

東芝は、スマートメータをICT網に接続するための無線メッシュネットワーク通信ユニットを開発した。この通信ユニットにより、スマートメータが無線メッシュネットワークを形成し、低コストでデータ収集を行うことができるようになる。この通信ユニットには、国際標準化組織IETF（Internet Engineering Task Force）のRPL（IPv6（Internet Protocol version 6）Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks）を採用し、新たに開発した最適経路選択アルゴリズムを搭載した。当社の事業所内でフィールド試験を行い、数千台を超えるスマートメータを持つネットワークに対しても、安定したデータ通信能力を持つことを実証した。

Efforts toward the realization of smart grid systems have recently become highly active throughout the world. Smart meters, which connect an information communication technology (ICT) network to a power network, are a key device in a smart grid system, ensuring efficient operation of the power systems.

Toshiba has developed a wireless mesh network communication unit that connects smart meters with an ICT network. The smart meters form a wireless mesh network, allowing the low-cost collection of network data via these units. The communication unit is equipped with our newly developed routing algorithm implemented on the Internet Protocol version 6 (IPv6) Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks of the Internet Engineering Task Force (IETF RPL). We have also evaluated the performance of the unit using our demonstrational environment, and confirmed that the unit has sufficient communication capacity to provide stable communication even in a network with thousands of smart meters.

1 まえがき

現在、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量削減などにより環境問題を解決するため、スマートグリッドの実現を目指した取組みが世界各国で行われている。スマートグリッドとは、電力網をICT網と連携させることで電力網を信頼性高く効率的に運用するものである。具体的には、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを導入することで化石燃料の使用量を削減したり、DR（Demand Response）制御と呼ばれる電気料金を動的に変化させる仕組みでピーク電力を抑制したりする。

このスマートグリッドのキーデバイスがスマートメータである。スマートメータとは、家庭や、ビル、工場などの需要家に設置される電気メータであり、各需要家の電力使用量をリアルタイムに電力網に通知する。このデータを用いることにより、きめ細かな電力網の制御が可能になる。

スマートメータと電力網の間の通信方式には、電力線を利用するPLC（Power Line Communication：電力線通信）方式や、無線メッシュネットワークを用いる方式など、様々な方式が検討されている。これらの中で無線メッシュネットワーク

は、適用できる対象が広く低コストで実現できることから有力視されている。

今回東芝は、スマートメータ用の無線メッシュネットワーク通信ユニットを開発した。ここでは、開発した通信ユニットの特長とプロトコル、新たに開発した最適経路選択アルゴリズム、及びフィールド試験で性能を実証した結果について述べる。

2 無線メッシュネットワーク通信ユニット

2.1 特長

検討されている通信方式の中で、PLC方式は、電柱上の隣接する変圧器を越えて通信をすることが難しく、変圧器ごとに通信の集約装置を設置する必要がある。このため、集約装置のコストを考えると、集合住宅や住宅密集地域に適している。一方、無線メッシュネットワーク方式は、山間部などを除いて幅広く適用でき、更に必要な集約装置の数を抑えられるため、低コストでスマートグリッドを実現できる（図1）。こうした特長から、無線メッシュネットワーク方式はスマートメータの通信方式として期待されている。

そこで当社は、スマートメータ用の無線メッシュネットワーク

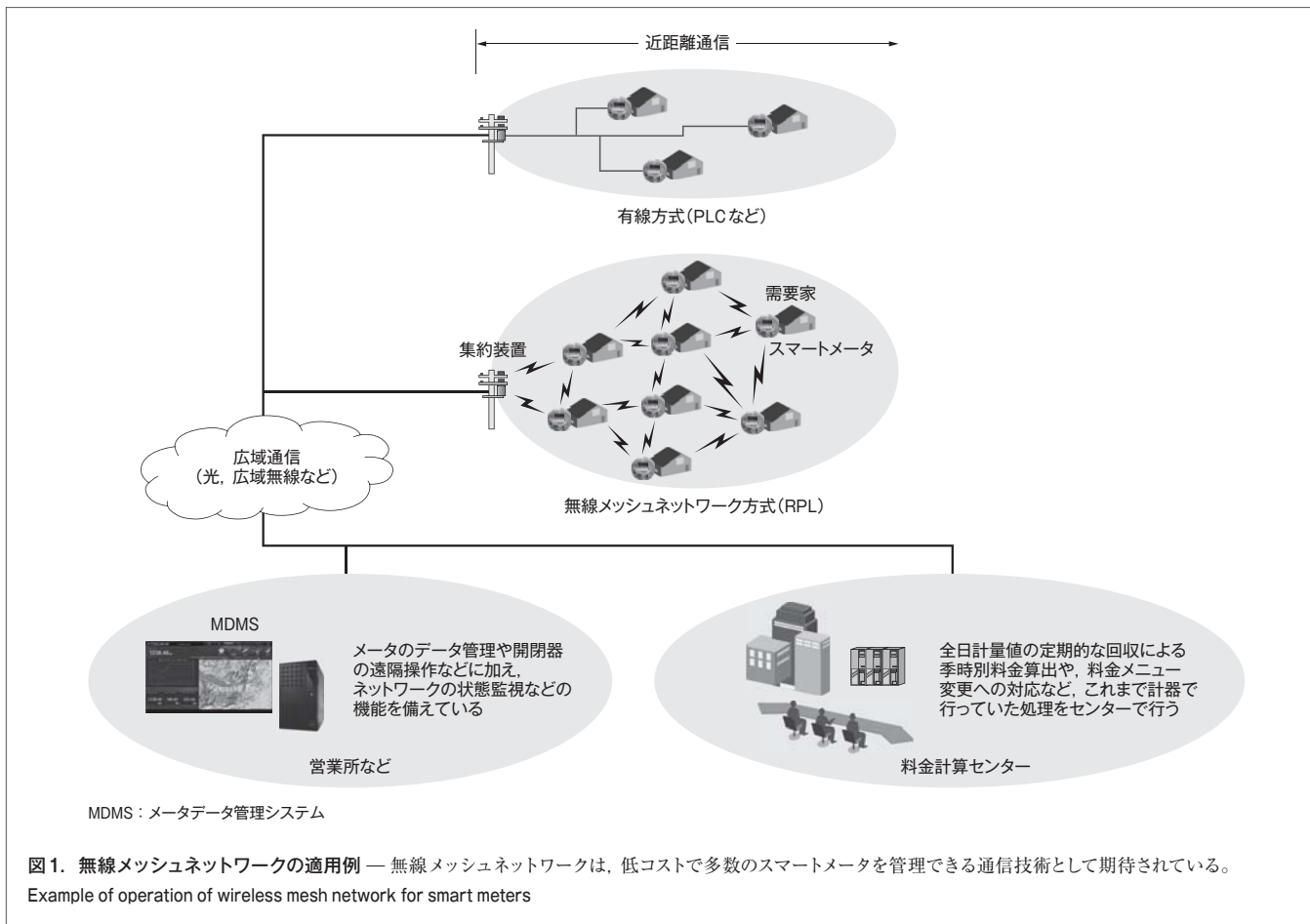


図1. 無線メッシュネットワークの適用例 — 無線メッシュネットワークは、低コストで多数のスマートメータを管理できる通信技術として期待されている。
Example of operation of wireless mesh network for smart meters

通信ユニットを開発した。この通信ユニットは、インターネット標準化組織であるIETFで標準化中の無線メッシュネットワーク用経路制御プロトコルRPL⁽¹⁾に加え、当社が新たに開発した最適経路選択アルゴリズムを搭載している。この最適経路選択アルゴリズムにより、無線メッシュネットワークが安定しているときだけでなく、機器故障発生時や電波障害発生時にも、障害箇所を迂回(うかい)した最適経路を選択して、通信を継続できる。

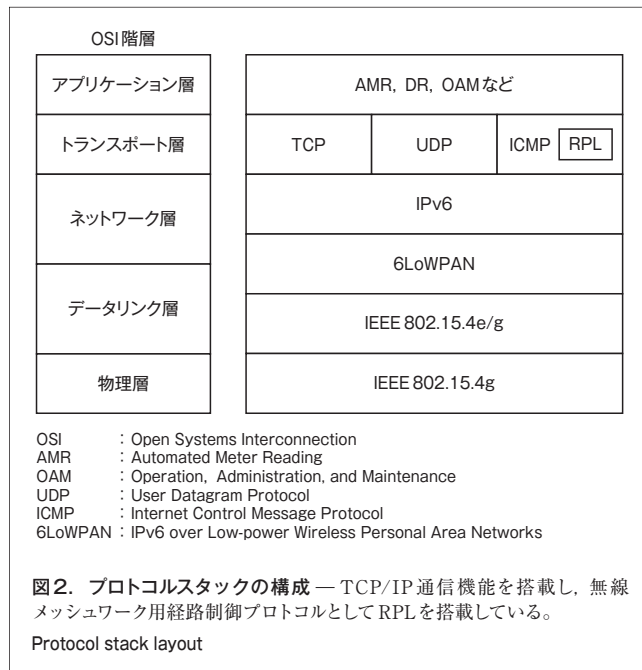
2.2 プロトコルスタック

今回開発した通信ユニットのプロトコルスタックの構成を図2に示す。物理層及びデータリンク層にIEEE 802.15.4 (電気電子技術者協会規格 802.15.4) 準拠の特定小電力無線^(注1)を使用し、ネットワーク層にはTCP/IP (TCP: Transmission Control Protocol) のIPv6を用い、更に無線メッシュネットワーク用の経路制御プロトコルとしてRPLを用いている。

2.3 RPL

RPLを用いると、スマートメータは近隣のスマートメータを発見し、自律的にメッシュ状のネットワークを形成できる。ス

スマートメータが測定した電力使用量などのデータは、隣接するスマートメータに送られ、その後次々とスマートメータ間で受け渡されながら集約装置まで転送される。



(注1) 2008年に制度化された950MHz帯を使用しており、2012年7月以降は新周波数帯である920MHz帯に対応する予定である。

データが受け渡される経路は、スマートメータどうしが交換する無線通信の品質指標を元に決定される。各スマートメータは、式(1)及び(2)によって集約装置までの仮想的な距離を示すRankを計算し、Rankがもっとも小さい経路を最適経路として選択する。

$$Metric = a + b \times \text{信号強度低下率} + c \times \text{再送率} \quad (1)$$

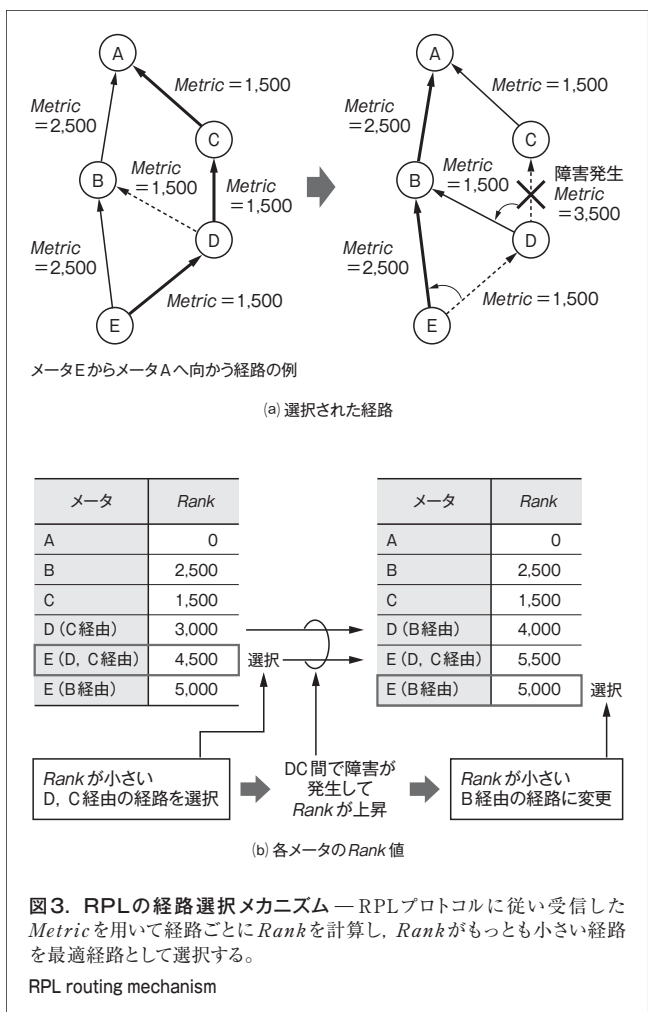
Metric : 自メータと接続先メータの間の無線通信品質の指標
a, b, c : 重み付け係数

$$Rank = Rank' + Metric \quad (2)$$

Rank : 自メータから集約装置までの仮想的な距離
Rank' : 接続先メータから集約装置までの仮想的な距離

経路に障害が発生したときに、RPLがRankに基づいて通信経路を変更するようすを図3に示す。

この経路選択アルゴリズムの優劣が無線メッシュネットワークの性能に大きく影響する。そのため、経路選択アルゴリズム



の検討が現在盛んに行われており、当社はいち早くそのアルゴリズム開発を行った。

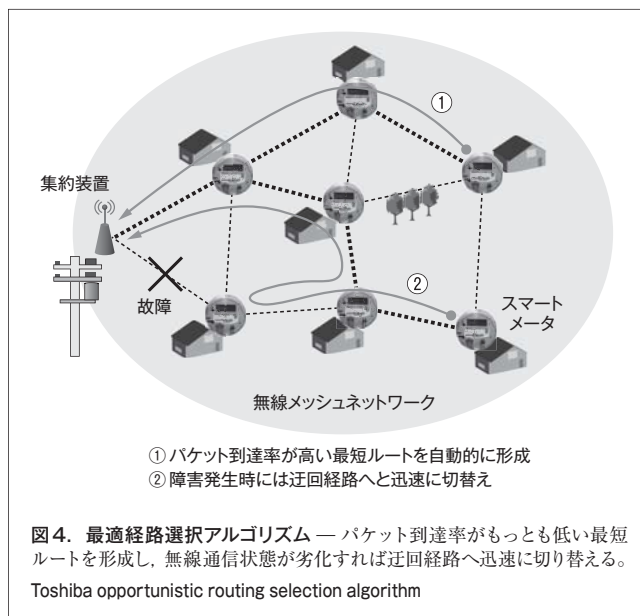
2.4 最適経路選択アルゴリズム

スマートメータから得られるデータは電力網制御に利用されるため、そのデータを運ぶ無線メッシュネットワークには、極めて高い信頼性が要求される。当社の最適経路選択アルゴリズムは、変動する無線通信状態を反映して、データの到達確率の高い経路を選択することで、高信頼性を提供できる。

無線を用いたデータ伝送では、ある確率で伝送誤りを生じる。このため、スマートメータを経由して転送される回数が少ないほど、データ伝送に成功する確率は高くなる。更に、受信電波の強度が高いほど、無線通信路上で誤りが生じる確率は一般に低くなる。このため、最適経路選択アルゴリズムの基本的な方針は、受信電波強度を考慮しつつ、集約装置までの経路上の中継スマートメータ数（以下、ホップ数と呼ぶ）を最少にすることと考えられる（図4の①）。

一方、無線通信では、電波干渉によって伝送誤り率が一般に増加する。この電波干渉の原因としては、他のスマートメータからの電波による干渉や、自身が送信した電波の反射波による干渉、他の電波ノイズ源による干渉などが挙げられる。こういった電波干渉が生じた場合、受信電波強度が低下しなくても伝送誤りが増加する。このため、このアルゴリズムでは、受信電波強度とホップ数に加え、パケット再送率をMetricに反映している。電波干渉は比較的短期間に干渉強度が変化するため、頻繁にパケット再送率を測定してMetricとして使用している。

このように、当社が今回開発したアルゴリズムは、受信電波強度とホップ数から、パケット到達率をもっとも高い経路を選択し（図4の①）、電波干渉などによるパケット廃棄が発生し



た場合には、迅速に迂回経路へ切り替える(図4の②)ことができる。

3 性能評価

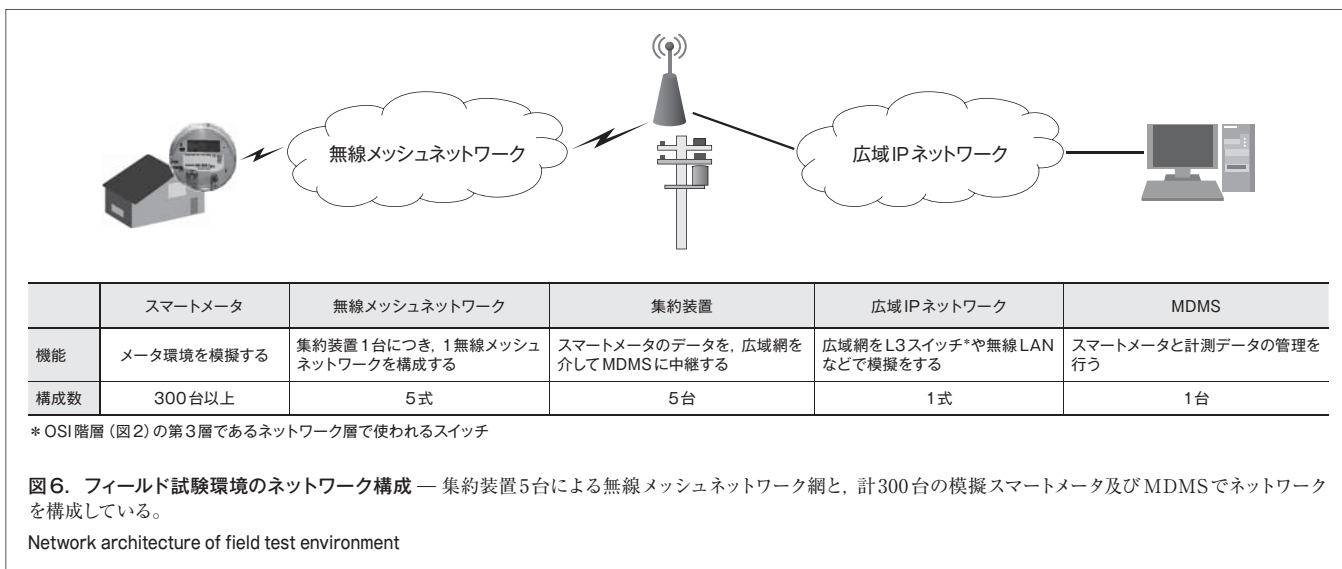
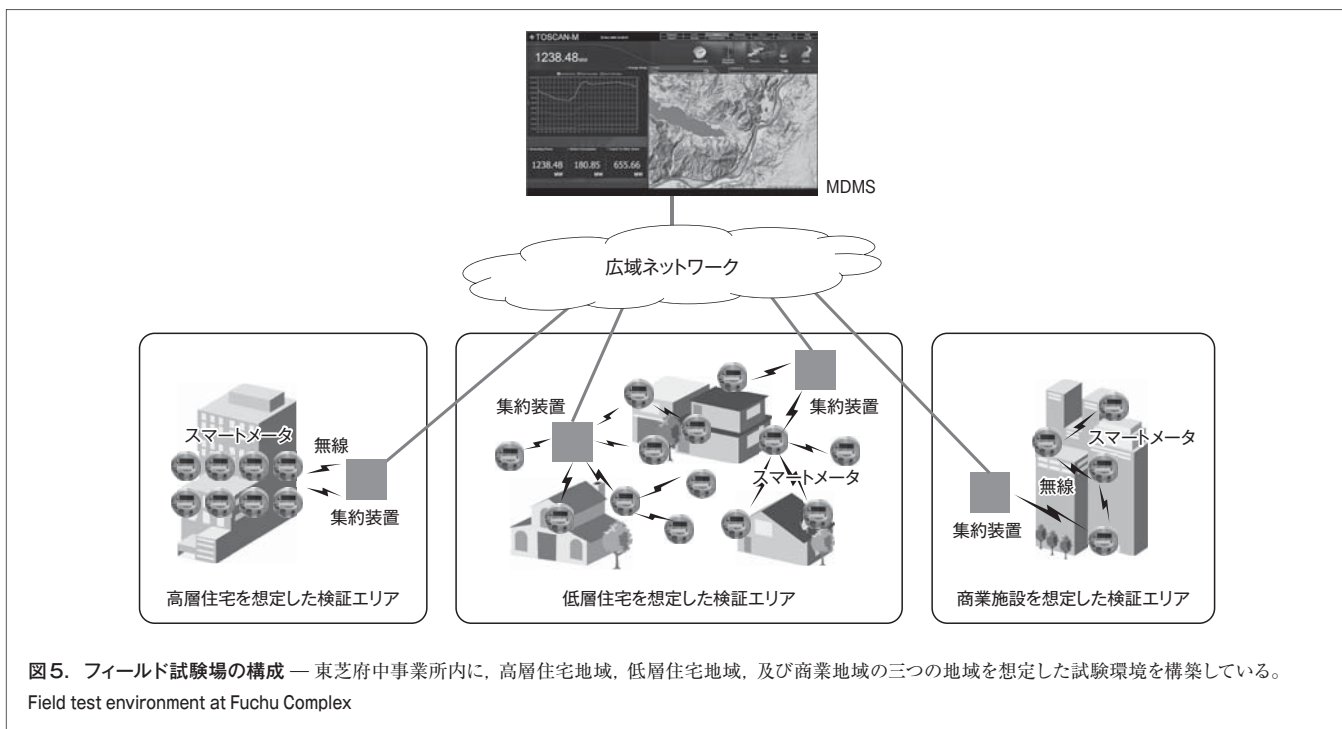
開発した通信ユニットの性能評価を、当社府中事業所内に構築したフィールド試験場を用いて行った(図5及び図6)。

このフィールド試験場では、事業所内の建家の配置状況と車両の交通状況から、高層住宅地域、低層住宅地域、及び商業地域を想定して試験環境を構築している。また、試験場内には、集約装置を5台、通信ユニットを組み込んだ模擬スマート

メータを屋内外で合計300台設置している。

商業地域の想定エリアで、各メータに5分周期で試験データを送信させた場合の到達確率を図7に示す。この試験環境では、厳しい条件下での性能を検証するために送信出力を低く抑え、一部のメータでは最良の経路でも10%以上の損失が発生する配置としている。集約装置には未着データを監視し再送要求を行う機能を導入しており、この機能と組み合わせることで、厳しい伝搬環境にあっても常に100%の到達確率を実現できることを確認した。

集約装置及び各メータの近傍で発生した経路制御トラフィック量を図8に示す。ここでは、約40台の模擬スマートメータ



を稼働させ、ホップごとに約10台程度がバランスよく接続されるように配置している。それぞれの近傍で発生する経路制御トラフィック量は数百ビット/s以下に低く抑えられている。特定小電力無線が数百Kビット/sの伝送帯域に対応することから、潜在的に数千台以上のメータを含むネットワークを管理できる十分なスケーラビリティを備えていることがわかる。

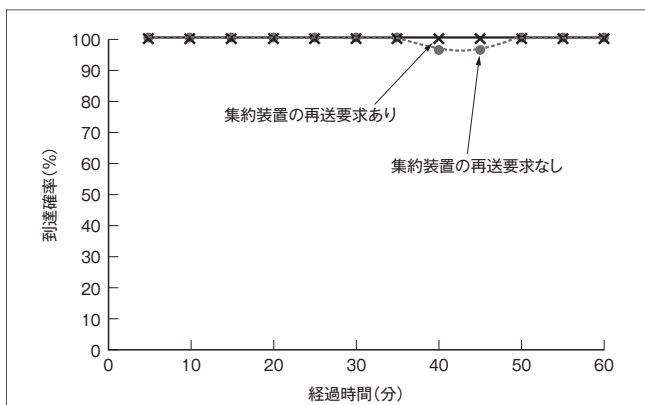
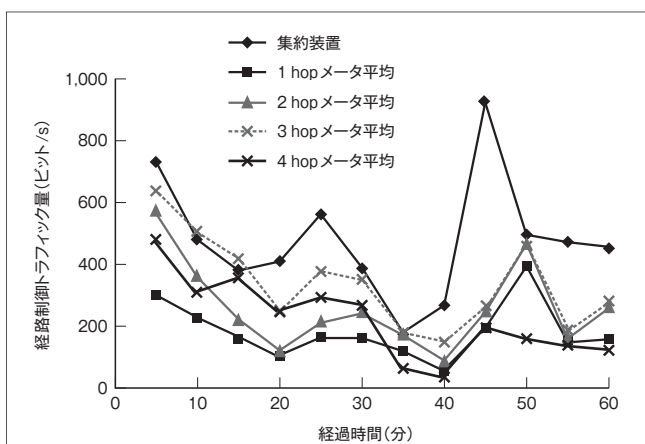


図7. 試験データの到達確率 — 一部のメータは最良の経路でも10%以上の損失が発生する配置としているが、集約装置にデータの再送を要求する機能を搭載することで、常に100%の到達確率を達成した。

Results of average reliability obtained by field test



N hopメータ平均：同じホップ数となるメータで集計した平均値

図8. 経路制御トラフィック量 — 集約装置及び各メータで発生する経路制御トラフィック量は数百ビット/sに抑えられている。

RPL control packet overhead in field test

4 あとがき

当社は、スマートメータ用の無線メッシュネットワーク通信ユニットを開発した。この通信ユニットは、IETF RPL仕様に準拠し、当社が開発した最適経路選択アルゴリズムを備えている。

フィールド試験場での通信ユニットの性能評価結果では、常に100%の試験データの到達確率を実現し、また、経路制御トラフィック量を低く抑え、潜在的に数千台以上のメータを含むネットワークを管理できる十分なスケーラビリティが得られることを確認した。

今後、最適経路選択アルゴリズムの普及に努めるとともに、更に高い信頼性を持つスマートメータ通信基盤の実現を目指して検討を継続し、スマートグリッドの発展に貢献していく。

文献

- (1) Winter, T. et al. "RFC6550 RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks". IETF Homepage. <<http://www.ietf.org/rfc/rfc6550.txt>>. (accessed 2012-06-20).



米山 清二郎 YONEYAMA Seijiro

研究開発センター ネットワークシステムラボラトリー研究主務。インターネットのプロトコル技術及び無線通信技術の研究・開発に従事。情報処理学会会員。Network System Lab.



中野 健治 NAKANO Kenji

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電力蓄電ソリューション・配電システム開発部。エネルギーシステムにおける通信システムの開発に従事。Power and Industrial Systems Research and Development Center



小林 崇裕 KOBAYASHI Takahiro

社会インフラシステム社 電力流通システム事業部 配電システム推進部参事。スマートメータ用通信システムの開発に従事。電子情報通信学会会員。Transmission & Distribution Systems Div.