

# 大規模ネットワーク対応のスマートメータ用マルチホップ通信

## Scalable Multi-hop Routing Protocol for Smart Meter Network

岡田 幸夫\* ・ 梅田 直樹\* ・ 土橋 和生\* ・ 山本 心司\*\*  
Yukio Okada Naoki Umeda Kazuo Dobashi Shinji Yamamoto

スマートメータ用通信において、ルート探索トラフィック負荷がきわめて小さく伝送環境の変動追従性に優れるルーティングプロトコルの開発により、親機1台当り端末1000台のネットワーク構築が可能で、電力線通信（PLC）と無線通信の両方に対応したマルチホップ通信システムを実現した。

また、適応型マルチホップ仮想セル形成法の開発によって、親機と端末の位置関係や端末密度など、さまざまな設置環境に適応して論理ネットワークを形成でき、設置設計や運用管理の省力化を可能にしている。

We have developed a multi-hop routing protocol highly adaptable for time-varying transmission environment with very low control overhead, which can build large scale multi-hop smart meter networks up to 1000 terminal nodes per single master node. This protocol is applicable to both power-line communication (PLC) and wireless communication.

In addition, an adaptive virtual cell forming method has been developed to organize logical networks appropriately for various installation environments regarding to the positional relation and the density of nodes. This method facilitates the deployment planning and operation management.

### 1. ま え が き

二酸化炭素の排出量削減が世界的に重要性を増しており、太陽光発電などの再生可能エネルギーの普及拡大が見込まれる。こうしたなか、電力消費の可視化や需要制御などを行うためのスマートメータが注目を集めている。政府が2010年6月に策定したエネルギー基本計画においても、早期に双方向通信が可能な次世代型送配電ネットワークの構築を目指すことが示されている。

スマートメータに用いる通信方式として、電力線通信（PLC：Power Line Communication）や、特定小電力無線が挙げられる。これらは通信線の敷設が不要なため新築だけでなく既存建物にも導入しやすいが、いずれの方式も直接通信できる範囲は限られており環境によっても異なる。通信範囲を拡大するための方策として、端末間で中継を行うマルチホップ通信が有効である。マルチホップ無線通信に関してIETFのMANET WG、ROLL WGなどで検討が行われており、これまでに幾つかのルーティングプロトコルが標準化されてきたが、低速な伝送方式での利用には課題が多い。ZigBee<sup>\*1)</sup>などもマルチホップ通信機能を備え

ているが、スケーラビリティに課題があり、大規模ネットワークでの実用化はあまり進んでいない。

筆者らは、マルチホップ通信技術を開発し、PLCを用いたスマートメータや集合住宅向け電力制御システムを実用化してきた。今回900 MHz帯の特定小電力無線に適用するための改良を行い、大規模ネットワーク対応のマルチホップ通信システムを実現した。本稿では、ルーティングプロトコルおよび適応型マルチホップ仮想セル形成法に関して述べる。

### 2. システム構成

図1(a)にスマートメータシステムの構成を示す。大規模集合住宅の場合は、パイプシャフトに端末が設置されるなど、無線通信では伝搬ロスが非常に大きくなる可能性があるため、PLCが適している。この場合、電気室に設置された変圧器の2次側に親機を接続するとともに、各住戸の電力メータに端末を設置し、親機と直接通信できない端末は他の端末を介してマルチホップ通信を行う。戸建住宅の場合は無線が適しており、柱上変圧器の2次側などに親機を設置する。小規模集合住宅のように電気室がなく柱上

\* 情報機器事業本部 情報機器R & Dセンター Research & Development Center, Information Equipment & Wiring Products Manufacturing Business Unit

\*\* 新規商品創出技術開発部 New Product Technologies Development Department

変圧器から直接引き込まれる場合は、PLC および無線のいずれも利用可能であり、図 1 (a) のように無線と PLC が混在したルートを用いてマルチホップ通信を行うことも可能である。

図 1 (b) に当社の集合住宅向け電力制御システム「幹線パワナビ<sup>1)</sup>」の構成を示す。幹線分岐盤に設置した親機と住宅分電盤に内蔵した端末がマルチホップ通信を行い、電力使用量が幹線ブレーカの容量を超過しそうになった場合には、住宅内で使用する電力を削減するように制御して幹線ブレーカが遮断されるのを防ぐ。

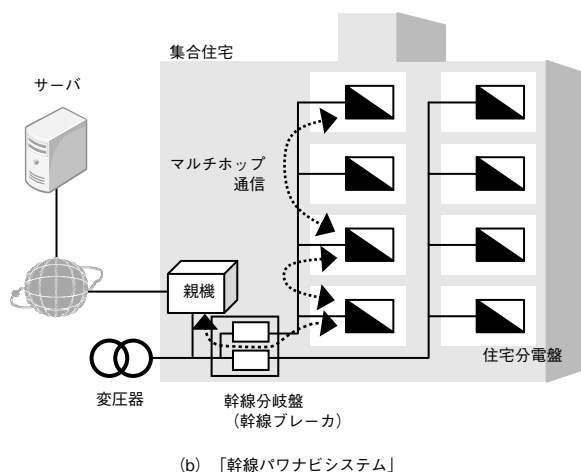
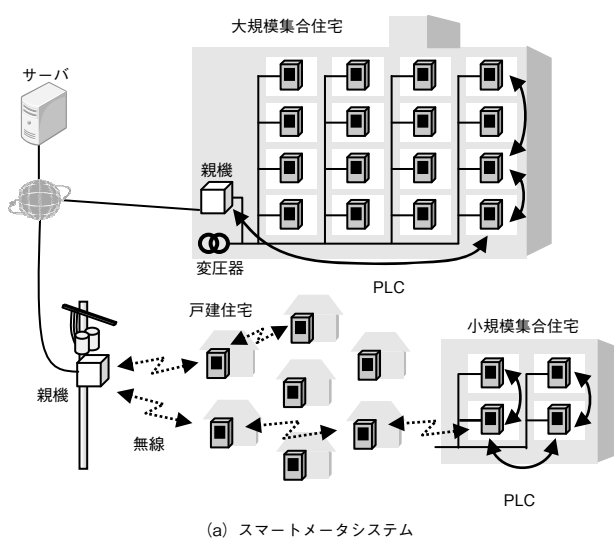


図 1 システム構成

### 3. マルチホップルーティングプロトコル

#### 3.1 概要

マルチホップ通信において、応答性や通信信頼性を高めるためには、できるだけ少ないホップ数で、かつ安定した中継ルートを選択する必要がある。マルチホップルーティングプロトコルは 10 年ほど前から IETF MANET WG において標準化が進められてきており、リアクティブ型とプロアクティブ型に大別できる。

リアクティブ型は通信要求発生時に宛先端末までのルートを探索する方法で、AODV や DYMO などがあり、IEEE802.11s や ZigBee のルーティングプロトコルも AODV をベースとしている。これらの方式では、RREQ と呼ばれるルート探索要求パケットをフラッディングで送信するため、端末台数が多くなると通信が輻そうしやすい。

一方、プロアクティブ型は、端末間で定期的にリンク情報を交換し、あらかじめ他端末へのルートを生成する方法である。代表例として OLSR や、これを改良した OLSRv2 が挙げられる。

今回の対象システムでは、フェージングや家電機器の動作状態などの影響を受けて PLC および無線のいずれにおいても端末間の伝送特性は変化するが、その変化は移動体通信と比べて小さい。また、リンク品質や安定性を重視してルートを選択することも考慮すると、プロアクティブ型を用いるのが適切である。

ルート探索に必要な情報は、一般的に端末数の 2 乗に比例して増加する。したがって、端末数が数百～数千台の大規模ネットワークにおいては、ルート探索トラフィックが増大しないための工夫が必要である。筆者らは、5 kbps 程度の低速 PLC に適用可能なルーティングプロトコル「CMSR (Centralized Metric based Source Routing)」を開発してきた<sup>2)</sup>。この「CMSR」は、端末間のルートを考慮せずに親機までのルートに限定して探索することにより端末間で交換する情報を削減している。さらに、通信品質の良い上位ノード（親機および端末）に限定してリンク情報を交換することと、リンクの差分情報だけを交換することにより、ルート探索トラフィックの大幅低減を実現している。以下で、「CMSR」の動作原理を述べる。

#### 3.2 動作原理

「CMSR」は、隣接端末間のリンク品質を調査する隣接ノード探索機能と、リンク品質に基づいてルートを生成するルート生成機能の二つで構成される。各ノードは一定時間ごとに HELLO メッセージをブロードキャスト送信し、隣接ノードとリンク品質情報を交換する。この部分は一般的なプロアクティブ方式と同様であるが、親機までのルート品質情報を HELLO メッセージに含める点や、仮ルートコストを用いてリンク品質調査対象を限定する点が異なる。

図 2 と図 3 を用いて動作手順を説明する。HELLO メッセージはすべてブロードキャスト送信であるが、図 2 では端末 6 の視点で矢印を示している。また図 3 においては、リンクで接続されているノード（親機および端末）の間では信号を受信可能なことを示し、リンク横に示す値はリンクコスト（リンク品質）を表している。隣接ノードからの HELLO メッセージを受信したら、受信時のリンクコストと、HELLO メッセージに含まれる上位ルートコストの和によって求まる仮ルートコストが低い順に数個のノード

ドを優先リンク先として選択する。表 1 に示す端末 6 の隣接ノードテーブルにおいては、仮ルートコストが低い順に端末 1 と端末 5 を選択する。その後、選択したノードアドレスと受信時のリンクコストを HELLO メッセージの LINK\_REQ サブメッセージに含めて送信する。それに対して、相手ノードは逆方向のリンクコストを LINK\_REP サブメッセージに含めて送信することにより双方向のリンクコストを把握できる (図 2)。このように、仮ルートコストが良好なノードに限定して双方向のリンク品質を調査することにより、トラフィックの削減を図る。

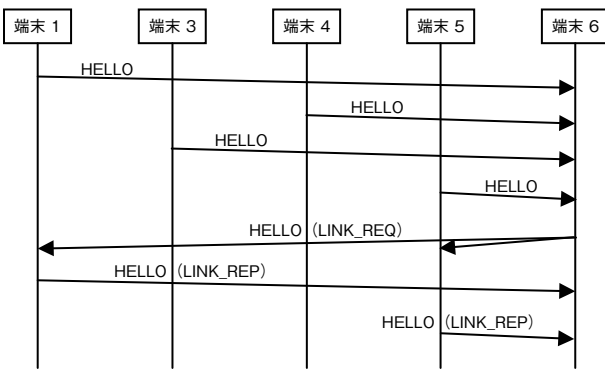


図2 ルート探索通信シーケンス

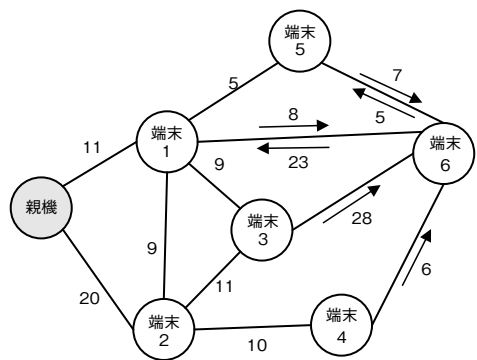


図3 論理トポロジー

表 1 端末6の隣接ノードテーブル

| 隣接端末 | リンクコスト (Incoming) | リンクコスト (Outgoing) | 上位ルートコスト | 仮ルートコスト | 正式ルートコスト |
|------|-------------------|-------------------|----------|---------|----------|
| 1    | 8                 | 23                | 11       | 19      | 34       |
| 3    | 28                |                   | 11+9     | 48      |          |
| 4    | 6                 |                   | 20+10    | 36      |          |
| 5    | 7                 | 5                 | 11+5     | 23      | 23       |

双方向のリンクコストの大きいほうを正式ルートコストとし、それらのうち最小のものをルートとして選択する。表 1 において、仮ルートコストは端末 1 が最小であったが、正式ルートコストが最小の端末 5 がルートとして選択される。なお、最終的に選択されなかったルートも代替ルートとして活用される。リンクコスト値は HELLO メッセージ

に含めて送受信するが、その変化が大きい場合のみ情報交換を行う差分方式とする。各端末は、定期的に隣接ノードに関する情報をトポロジー通知メッセージとして親機に送信し、親機はこの情報を基に、ルートコストが最小となるルートを決定する。

プロアクティブ型の場合、一般的に伝送状態の変化に対する追従が遅く、HELLO メッセージ送信間隔に比例した時間が掛かる。「CMSR」では、一時的に伝送路状態が悪化して通信不能に陥った場合に早急に回復させるため、リアクティブ型で用いられるルートエラー通知機能を付加することによって短時間でのルート切替を可能としている。また、送信元が最終宛先までのルートを指定するソースルーティングの採用により、中継端末でのルートテーブル保持を不要とし、RAM 使用量を低減している。

### 3.3 性能評価

前節で示したトラフィック削減効果を検証する。端末数を 1000 台まで変化させた場合のルーティング負荷のシミュレーション結果を図 4 に示す。なお、HELLO メッセージ送信間隔は 30 分とする。「CMSR」は、標準的な OLSR に比べて端末数の増加に対する負荷の増加が緩やかで、きわめて低トラフィックであることがわかる。これにより、数 kbps 程度の低速 PLC においてもアプリケーション通信のための帯域を十分確保できる。最近では 100 kbps 程度の PLC も開発されており、また 900 MHz 帯の無線でも同程度の通信速度であるが、実効スループットは数十 kbps に留まる。図 4 において端末が 1000 台の場合、OLSR では 14 kbps 程度のルーティング負荷となり、実効帯域のかかなりの部分を占めてしまうが、「CMSR」の場合は 200 bps 以下に収まっており、帯域のほとんどをアプリケーション通信で利用可能である。さらに、HELLO メッセージ送信間隔を短くして変動追従性を高めることも可能である。

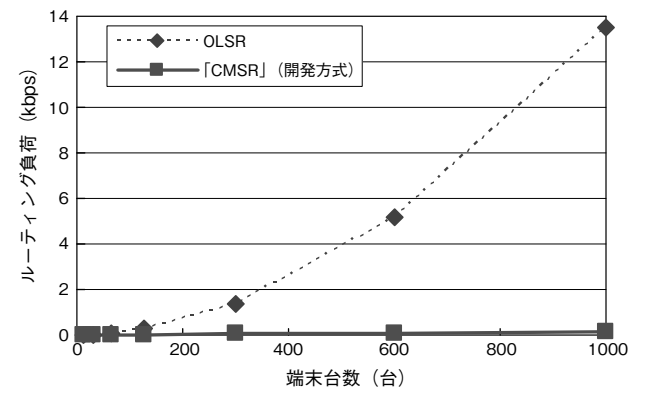


図4 ルーティング負荷

PLC では、無線と同様に隠れ端末問題が発生するうえ、異なる変圧器や配電盤に接続された電力線間であっても信号干渉やパケット衝突が発生する場合がある。このような

状況下での通信性能を把握するため、図5のような模擬配線においてルーティングプロトコルを動作させ、マルチホップ通信エラー率を測定する。スマートメータシステム単独の場合は $2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$ であったが、スマートメータおよび「幹線パワナビ」の両方のシステムが共存する場合はトラフィックが大幅に増加するため若干悪化して $1 \times 10^{-3}$ 程度となった。共存時の最大端末台数は約800台とした。ただし、これらのエラー率は上位層再送を行わない場合の値であり、再送によって監視制御ネットワークに必要な信頼性の確保が十分可能である。



図5 伝送評価用模擬配線

次に、実環境において約200台の端末を用いて長期間の評価を行う。前述と同様のアプリケーション通信エラー率を測定した結果を図6に示す。1日当りの通信回数は1万回である。日によって変動はあるものの、上位層再送なしの場合は、 $2 \times 10^{-3}$ 程度のエラー率である。模擬配線での評価結果よりも若干悪化しているが、実環境では家電機器などのノイズによる伝送路特性の変動が大きいためと思われる。評価中に各端末のルートは実際に日や時間帯によって変化しており、伝送路の変化に追従してルートを適切に選択していることを確認している。上位層再送を行った場合は、全期間にわたって通信エラーは発生しておらず、通信信頼性が非常に高いことがわかる。

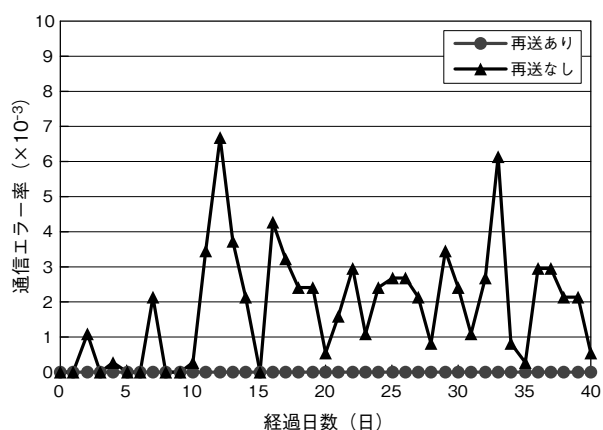


図6 実環境における通信エラー率

## 4. 適応マルチホップ仮想セル形成法

### 4.1 900 MHz帯の伝搬特性

本章では、前章で述べたプロトコルを900 MHz帯の特定小電力無線に適用するための方策を検討する。ネットワークシミュレーションを行う際、電波伝搬特性を考慮する必要がある。これまでに提案されている伝搬損失推定モデルには奥村-秦式やWalfisch-池上モデル<sup>3)</sup>などがあるが、これらは主に携帯電話などの移動体通信を想定している。ここでは、電柱の6.5 m程度の高さに設置される親機と2 m程度の高さに設置される端末との間、または端末間の通信を対象とする。既存モデルおよび今回対象とするアンテナ高さや通信距離の関係を図7に示す。Walfisch-池上モデルは比較的对象領域に近いが、アンテナ高さ<建物高さの場合は距離500 m以上に適用範囲が限定される。今回の端末間通信は送受信いずれも建物高さよりもかなり低いいため、そのまま適用できない可能性が高い。

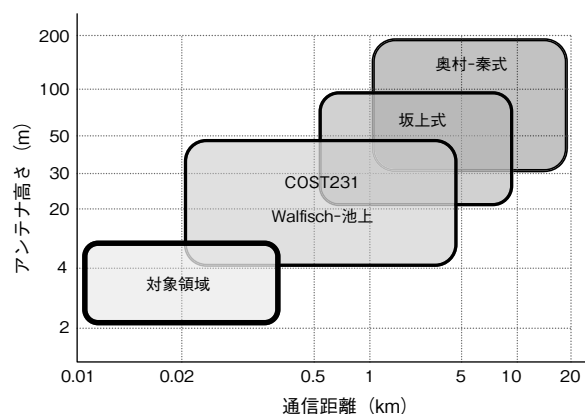


図7 電波伝搬モデルの適用領域

今回対象とする条件における伝搬特性を明らかにするため、5箇所の住宅地の計1000点での950 MHz帯の伝搬損失を測定する。送信アンテナ高さは6.5 m、2 mの2通り、受信アンテナ高さは2 mとする。代表的な市街地（住宅密集地）と郊外の測定結果を図8に示す。Walfisch-池上モデルによる計算値も示しているが、測定結果とは乖離がある。

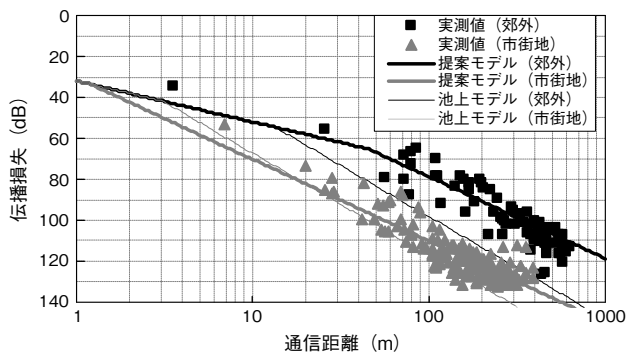


図8 900 MHz帯の伝搬特性

そこで、既存の伝搬モデルを参考にして式(1)を定め、実測値から重回帰分析を行ってパラメータを決定する。 $d$ は送受信間距離(m)、 $h_b$ は送信アンテナ高さ(m)、 $w$ は平均道路幅(m)である。アンテナ高さが建物高さよりも低いこと、測定データと平均建物高さとの相関が低いことから、平均建物高さはパラメータに含めていない。また、受信アンテナ高さと周波数は固定としたため、これも式(1)には含めていない。

$$\text{伝搬損失(dB)} = \alpha \log d + \beta \log h_b + \gamma \log w + \delta \quad (1)$$

重回帰分析の結果、 $\alpha = 39.8$ 、 $\beta = -12.5$ 、 $\gamma = -31.3$ 、 $\delta = 56.1$ となった。求めた式を提案モデルとして図8に示す。ただし、式(1)が自由空間伝搬損失よりも小さくなる場合は、自由空間伝搬損失の値を用いた。回帰式と実測データの平均残差は8.6 dBであり、比較的良好な推定精度が得られている。以後のシミュレーションにおいては、この伝搬損失モデルを用いる。

## 4.2 課題

前述のルーティングプロトコルにおいて、各端末はもっともルートコストが小さい親機を選択してルートを生成する。この場合、選択した親機配下のマルチホップ仮想セル(以下、セルと記す)に参入したことになる。PLCの場合は、信号の変圧器越えや配線間クロストークなどがあるものの配線形態によっておおむね論理トポロジーが定まるため、想定どおりのセルに参入することが多い。一方、無線の場合は、親機や端末の分布密度、建物などとの位置関係によって、意図しないセルへの参入や特定のセルへの参入偏りが発生することがある。

市街地と郊外などのように端末密度に大きな差がある設置環境において、ルーティングプロトコルのシミュレーションを行う。シミュレーション諸元を表2に示す。実仕様では親機1台当たりの端末最大収容台数は1000台であるが、ここでは本法の有効性を確認するために十分といえる50台の縮小モデルを用いる。

表2 シミュレーション諸元

|         |                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------|
| エリア     | 800×800 m                                               |
| 端末密度    | 500 台/km <sup>2</sup> (市街地), 125 台/km <sup>2</sup> (郊外) |
| 親機台数    | 4 台                                                     |
| 端末台数    | 200 台                                                   |
| 最大収容台数  | 50 台/親機                                                 |
| アンテナ高さ  | 6.5 m (親機), 2 m (端末)                                    |
| アンテナ特性  | 等方性アンテナ                                                 |
| 伝搬損失モデル | $39.8 \log d - 12.5 \log h_b - 31.3 \log w + 56.1$      |
| 送信出力    | 10 dBm                                                  |

図9にシミュレーション結果を示す。図の左半分は市街地を想定して端末を密集させ、右半分は郊外を想定して端末密度を低くしてある。親機4台のいずれかのセルに参入した端末は親機と同色(4階調グレー)で表示しており、白色はどのセルにも参入していない孤立端末を表す。各端末がルートコストの小さい親機を選択した結果、親機1と親機2のセルへ参入が集中し、最大収容台数に達したことが孤立端末の発生要因である。親機3と親機4のセルでは収容台数に余裕があるが、左端の孤立端末は親機3や親機4に至るルートがないため参入できない。最大収容台数を増やせば親機1や親機2に参入できるようになるが、親機のメモリーリソースや通信速度によって最大収容台数には上限がある。したがって、最大収容台数に対して実際の設置可能端末台数を少なめにするしかなく、言い換えると親機を多めに設置することになり設置コストの増加を招く。

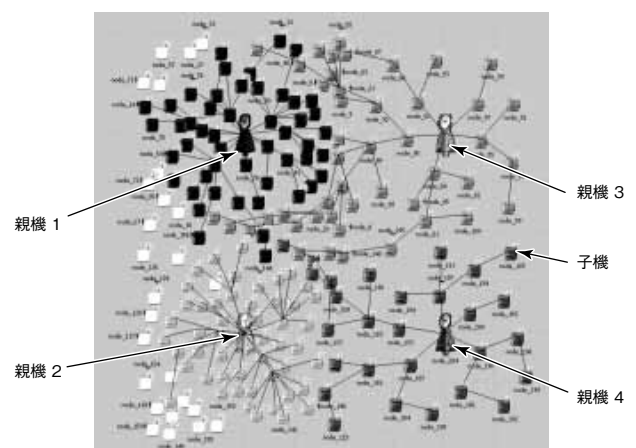


図9 従来方式のセル形成

## 4.3 参入端末台数を考慮したセル形成

マルチホップルーティングプロトコルにおいて、消費電力の最小化やスループットの向上を目的とした研究<sup>4), 5)</sup>は行われているが、端末台数を考慮した経路選択はあまり検討されていない。前節で述べた問題を解決するため、各セルの参入端末台数を考慮してルートコストに重みづけを行う。すなわち、わずかなルートコストの悪化は許容し、

残り収容台数に余裕があるセルに参入しやすくする。さらに、参入端末数とルートコストを考慮して、セル参入後も他セルへの移動を許容する。

具体的には、HELLO メッセージに参入端末台数を格納して送信するとともに、参入不可能な場合は親機に要求して既参入端末を他のセルに移動させる。各端末は他セルへの移動可否と、移動後のルートコストをトポロジー通知メッセージで親機に通知しており、親機はこれを考慮して移動対象の端末を選択する。また、既存ルートへの影響を低減するため、ルート末尾の端末を優先的に選択する。これらはHELLO メッセージやトポロジー通知などの既存のルーティングパケットを利用するため、ほとんどトラフィックを増やすことなく実現可能である。

以上のアルゴリズムを付加した場合のシミュレーション結果を図 10 に示す。中央付近の端末が親機 3 と親機 4 のセルに参入しており、これによって、図 9 では孤立していた左端付近の端末が、図 10 では親機 1 と親機 2 のセルに参入できるようになり、孤立端末の発生が回避されている。

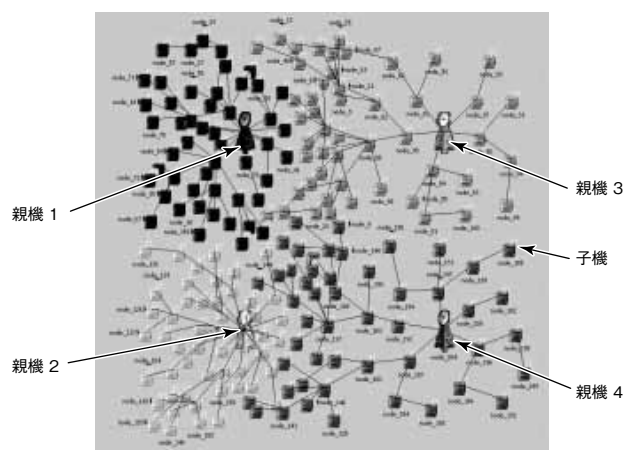


図 10 開発方式のセル形成

次に、全親機の最大収容台数の合計に対する実際の端末数の割合を変化させた場合の、孤立端末発生率を図 11 に示す。参入端末台数を考慮しない場合は、端末数が少なくても孤立端末が発生し、端末数 100 %、つまり最大収容台数と同数の場合は 30 % 近い孤立端末が発生している。一方、参入端末台数を考慮した場合は孤立端末が半分程度に減少しており、さらにセル間移動を許容した場合は孤立端末の発生を回避できている。これにより、親機の設置台数を必要最小限に抑制でき、導入コストの低減が可能となる。また、故障や保守で親機が停止しても、端末は適切に他セルに収容されるため、不慮の事態にも対応可能である。

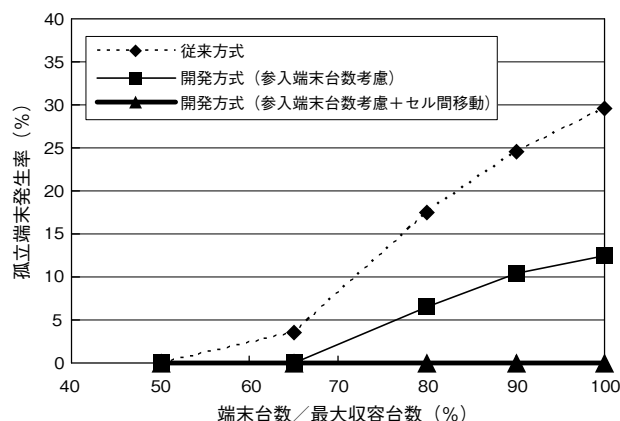


図 11 孤立端末発生率

## 5. あとがき

スマートメータ用通信において、ルート探索トラフィック負荷がきわめて小さく伝送環境の変動追従性に優れたルーティングプロトコルの開発により、親機 1 台当り端末 1000 台のネットワーク構築が可能で、電力線通信 (PLC) と無線通信の両方に対応したマルチホップ通信システムを実現した。また、適応セル形成法の開発によって、親機と端末の位置関係や端末密度など、さまざまな設置環境に適応して論理ネットワークを形成でき、設置設計や運用管理の省力化を可能にした。

今後は、本法をスマートメータシステムに展開するとともに、住宅内のエネルギーマネジメントシステムなど他システムとの連携を図って行く予定である。

---

## ●注

\* 1) ZigBee : ZigBee Alliance が策定した近距離無線通信規格

## \*参考文献

- 1) 川口 慶：集合住宅用ピークカット電力制御システム「幹線パワナビシステム」，松下電工技報，Vol. 56, No. 2, p. 76 (2008)
- 2) 岡田 幸夫，土橋 和生：低速電力線通信に適したプロアクティブ型マルチホップルーティングプロトコル CMSR，電子情報通信学会技術研究報告 AN2007-25, p. 61-66 (2007)
- 3) Urban transmission loss models for mobile radio in the 900-and 1800 MHz bands, COST 231 TD (90) , 119 Rev. 2 (1991)
- 4) 三木 富美枝，野林 大起，福田 豊，池永 全志：無線メッシュ網における経路特性を考慮した AP 選択手法，電子情報通信学会技術研究報告，IN2010-158, p. 85-90 (2010)
- 5) 森崎 明，渡辺 晃：通信状態を考慮したアドホックルーティングプロトコルの検討，情報処理学会 DICO2010 論文集，Vol. 2010, No. 1, p. 645-651 (2010)

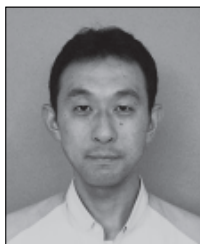
---

## ◆執筆者紹介



岡田 幸夫

情報機器 R & D センター



梅田 直樹

情報機器 R & D センター



土橋 和生

情報機器 R & D センター



山本 心司

新規商品創出技術開発部  
第一級陸上無線技術士