

**高校生のページ****あらゆる物との通信を実現する未来社会**

情報学研究科 通信情報システム専攻 通信システム工学講座 伝送メディア分野

守倉正博

**1. はじめに**

電磁波はイギリスのマクスウェル (J.C.Maxwell) がその存在を理論的に予言し、ドイツのヘルツ (H.R.Hertz) によってその存在が実験的に確認されました。この電磁波を通信の実用化に貢献したのはイタリアのマルコーニ (G.Marconi) であり、1899年にイギリス～フランス間での通信実験などに成功しています。その後100年余りの研究開発により、無線通信システムは飛躍的な進歩を遂げています。日本で携帯電話の前身となる自動車電話方式が実用化されたのが1979年であり、その後、掌で扱える携帯電話が実現されました。「何時でも、何処でも、誰とでも」というのが、通信における1980年代の目標で、テレビアニメで主人公が腕時計型の無線電話を使っているのを何とか実現しようという意気込みが強くあった時代です。またインターネットを利用する際に用いられるウェブブラウザが登場したのも1993年で、従来の電話利用の通信からデータ利用の通信に大きく変化した時でした。

各家庭にはメタリックケーブルで高速通信を行う方式や2000年頃に商用化された光アクセス方式により各家庭に高速データ通信サービスが利用可能な時代に入りました。その際、ケーブルを部屋内や部屋間で引き回すのは工事が大変で、壁の中に収容しないと子供がケーブルに足を引っかけて危険であるし、美観上も問題でした。そこで、1990年代から無線LAN (Local Area Network) が研究開発されました。無線LANは世界中のどのメーカーが製造しても互いに通信できるようIEEE 802.11シリーズの国際標準規格として種々定められています。大手量販店に行くと「IEEE 802.11a,b,g,n 規格準拠」等の表示を見かけることがあると思います。無線LANはノートパソコンだけでなく、ゲーム機、タブレット端末、プリンター、カメラ等種々の機器に使われて、非常に便利になっています。家だけでなく会社、学校、街角のコーヒーショップ、ホテル、空港、駅等様々な場所で公衆無線LANが利用可能になっており、多くのコンピュータ端末がインターネットに接続され、「人と人との通信」に加えて「人と機械との通信」が実現され、今日に到っています。

これまで、通信システムは有線・無線のいずれの方式にしても、多くの情報を伝達するための研究（ブロードバンド化）を推進してきました。その一方、将来の通信システムとして次に世界中が注目しているのが伝送する情報は小さくても端末の数が膨大な「機械と機械の通信」です。この通信システムはM2M (Machine to Machine) システムと呼ばれています。では、なぜ、M2Mシステムが注目を浴びるのかと言いますと、人類が直面する大きな課題であるエネルギー問題や環境問題に加えて、地域社会で安心安全なコミュニティを実現することが要望され、そこにM2Mシステムが利用されようとしているからです。

**2. 機械と機械との通信**

世界的に化石燃料の使用によるCO<sub>2</sub>排出は地球温暖化等の環境問題が生じます。特に現代社会は電気エネルギーが重要となっており、いかに化石燃料使用を減らし、持続可能な社会を築けるかが重要です。そのためには風力発電や太陽光発電といった再生可能エネルギーを組み合わせ、時々刻々変動する発電量と電力使用量を制御しなければなりません。このような目的のために研究開発が進められている

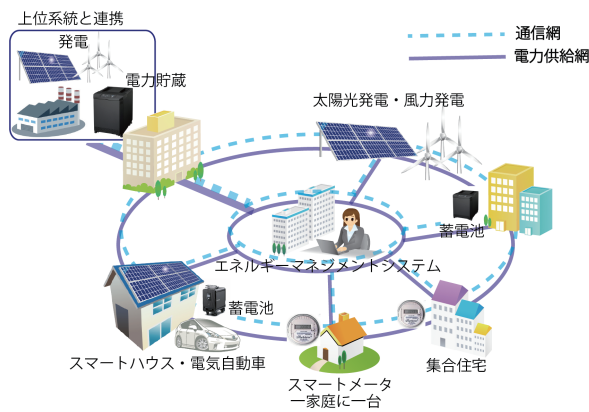


図1 スマートグリッド



図2 スマートグリッド用ワイヤレスアクセス

のが図1に示すスマートグリッドと呼ばれる電力需給システムです。スマートグリッドの特徴は電力供給網と通信網を融合させたシステムです。このシステムは情報通信という仮想世界 (Virtual World) と電気エネルギーという実世界 (Real World) を結びつけるものでもあります。通信ネットワークの中核は光ファイバーネットワークを中心とした高品質で高速な通信システムとそれらの末端部分で多くの情報収集を行うワイヤレスアクセスネットワークから構成されます。末端部分でワイヤレス方式が採用される理由は設置の簡便性とコストの点で優れるからです。我々の研究室では無線通信方式という観点からこのスマートグリッド用のワイヤレスアクセスシステムの研究を進めています。

図2にはスマートグリッドを構成する重要な要素であるスマートメータと双方向の通信を実現するスマートグリッド用ワイヤレスアクセスの実現例を示しています。このワイヤレスアクセス方式に用いられる無線周波数は2.4 GHz帯域や920 MHz帯域の利用が想定されています。ワイヤレスアクセスシステムはスマートグリッドに限らず、災害対策用システム、環境保全監視システム等の様々な監視制御アプリケーションに対応できるプラットフォームとして望まれます。このプラットフォームで使用されるワイヤレス端末の長年にわたる保守を簡易化するためには、どうしても電池の交換を無くすことが重要です。これまで一人で数台の無線端末を保有している状況で、電池交換を行うのであれば現実的です。しかし一人で数百、数千台といった無線端末を保有する時代になると、電池交換するだけで大変です。この問題を解決するため、我々はENTERPRICE M2M ネットワーク (M2M network consisting of Enormous Number of TERminals without PRImary CELls) と名付けたワイヤレスアクセスシステムの研究を行っています。このシステムは、数百台から数万台に及ぶ端末数、数 kbit/s から数 Mbit/s に及ぶ伝送速度、これら全ての監視制御アプリケーションの要求を統一的に扱え、エネルギー供給も電池ではなく、エナジーハーベストやマイクロ波給電といった技術を用いて実現しようと考えています。

研究対象となる ENTERPRICE M2M 無線ネットワークの要求条件の一つは、従来の無線 LAN で想定されていたアクセスポイント (基地局) 毎のサービスエリア半径と比較して非常に大きいことです。また、サービスエリア半径が大きいため、競合型の媒体アクセス制御を用いる場合にデータフレームの送信権獲得に際して互いに競合 (contention) する端末数が膨大となります。

## 2.1 媒体アクセス制御

ENTERPRICE M2M 無線ネットワークを実現するために用いられる媒体アクセス制御は CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) と呼ばれる方式です。この方式の原理について図3を用いて説明します。この方式は別名 Listen before Talk 方式と呼ばれる方式です。会議で人



図3 Listen before Talk 方式

が発言する場合のルールと同じです。つまり、「話す前には必ず、他の人が話していないか確かめてから話せ」ということです。他の人が話している最中に自分も話すとそれ以外の人は音声混ざって何を言っているのか分からなくなるからです。しかしこの方法でも一人の人が話している時に、次に話そうとする人が二人以上いると、最初の人話し終えた

途端に次の二人の人が話し始めて、音声混ざって困ります。同じことがM2M無線システムでも起こります。この事象を少なくするために考えられたのが下図に示すCSMA/CA方式です。

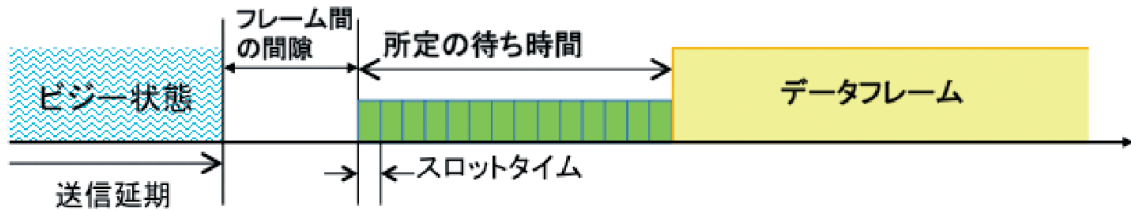


図4 CSMA/CA 方式

図3の場合と同様に、他の端末がデータフレームを送信している時は、じっと聞いている必要があるため「ビジー状態」となります。そのビジー状態が終了するのを待って直ぐに自分のデータフレームを送信しようとする時、他にも送信したい端末がある場合に、データフレームが互いに衝突してしまいます。それを避けるために、フレーム間の間隙分だけ送信を待った後に、各端末はスロットタイムの整数倍となるランダムな時間だけ待つことが要求されます。つまり各端末は0～CW (Contention Window) までの大きさを持つサイコロを振り、出た目の数だけスロットタイムを単位として待ちます。もし、自分の端末が待っている間に他の端末が送信を始めたら、待ち時間を次ぎに持ち越して再度同じ動作を行います。こうすることによって、ビジー状態で待っている端末同士が同時にデータフレーム送信をする事象を少なくしています。偶然にも同じサイコロの目が複数の端末で出た場合は、仕方ありませんがデータフレームの衝突になってしまいます。

2.2 仮想グループ化

膨大な端末数の無線システムで、CSMA/CA を用いる際の課題として、トラヒック輻輳時のスループット劣化があります。スループットとは無線システムの入力として送信しようとしたデータ量に対して実際に受信されて運ばれたデータ量のことを言います。想定されるシステムでは1台のアクセスポイントに6000台以上のセンサ端末を同時に収容する必要があります。この時、例えばショッピングモールに設置されたセンサ端末で火災が発生した時に煙センサ等が一斉にデータフレーム送信を行います。端末からアクセスポイントへの輻輳が起こり、結果としてスループット劣化に至ります。この現象はCSMA/CAの原理を考えれば容易に想像できます。つまり端末台数が多くなればなるほど、サイコロ

を振る時に同じ目の端末が多くなるからです。

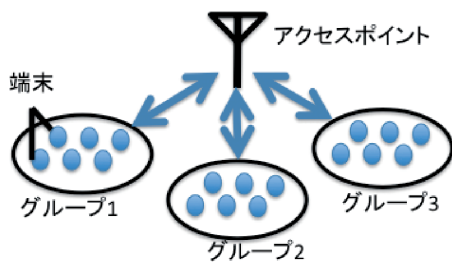


図5 端末のグループ化

この課題を解決するためには、端末からのトラヒックの輻輳を緩和することが必要であり、同時にデータフレーム送信を試みる端末数を意図的に減らすグループ化が有効です。図5に端末のグループ化を示します。こうすれば、6000台の端末があつたとしても、グループ化をすることにより、トラヒックの輻輳によりデータフレームが衝突する確率は下げることができます。ただし、この方式ではアクセスポイントから端

末に対して、どのグループに属してどのような期間だけ通信すれば良いかということを中心制御する必要があり、アクセスポイントや端末の機能が複雑になるという欠点があります。

当研究室ではこの問題を解決するために、図4の「フレーム間の間隙」部分を工夫することにより、端末を仮想的にグループ化する方式を見いだしました。仮想グループ化が実現できれば、アクセスポイントが端末を中心制御することから解放され、装置の複雑さが軽減されます。「フレーム間の間隙」部分の動作は、ランダム AIFSN (Arbitration Inter-Frame Space Number) 方式を用いています。AIFSN を用いる元々の目的は送信優先度の設定であり、優先度に応じて固定的に AIFSN の値を設定します。例えば、優先度の高い端末には小さな AIFSN を設定し、早く通信が開始できるようにします。一方、本ランダム AIFSN 方式では、各端末はサイコロを振る際に、AIFSN の値を  $[2, AIFSN_{max}]$  の範囲で一様ランダムに再設定します。これにより、図6に示されるように、全員が同じ AIFSN の値を用いる場合と比較し、競合に参加する端末の数が減ります。これは、グループ化によって競合に参加する端末を少なくすることと等価であり、仮想グループ化と呼んでいます。

図7に、ランダム AIFSN 方式のスループット特性を示します。本図は、入力トラフィックが増加し輻輳状態になったとしても、 $AIFSN_{max} = 20$  程度に設定すれば、仮想グループ化によりスループット特性が劣化しないことを示しています。

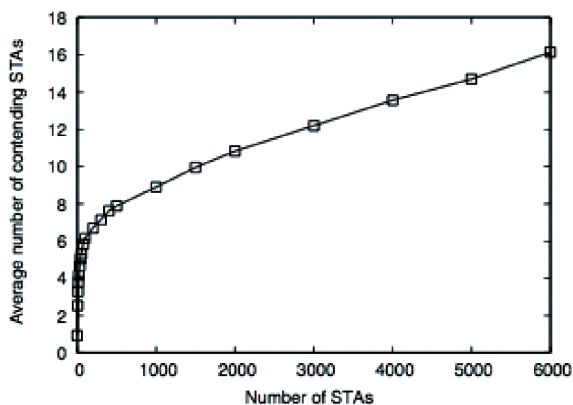


図6 競合に参加する平均端末数

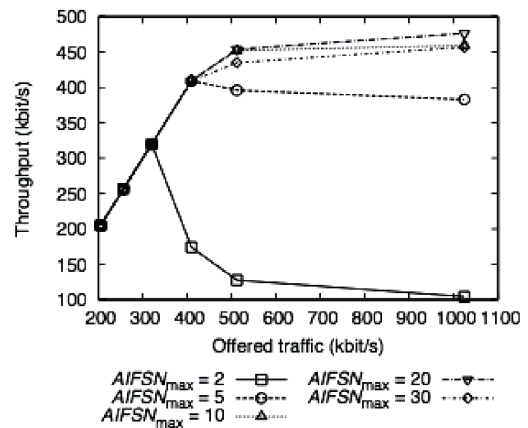


図7 ランダム AIFSN 方式のスループット特性

### 3. 電池無しのワイヤレス端末

既に2章で述べたように、多数のワイヤレス端末から構成されるシステムでは通常運用時のメンテナンスの点で端末のバッテリーレス化が望ましいです。したがって電灯線以外の何らかの手段により、コンデンサ等に充電しながら行う給電が必要です。

図8は、例として病院内における M2M 無線ネットワークを示しており、多数のセンサを必要とすることと、近距離の通信であることからマイクロ波送電によりワイヤレス端末のコンデンサへの給電を行うシステムです。

マイクロ波電力伝送には、電波防護指針により空間内の電力に 15 GHz 以上では  $1 \text{ mW/cm}^2$  という制約があるものの、1 cm 四方の面積で原理的には最大 1 mW の給電が可能です。今後、省電力化された無線 LAN チップの消費電力として、送受信動作時に 100 mW、スリープ時に数  $\mu\text{W}$  と想定すると、単純にはデューティ比を 1/100 程度に抑えれば良いことになります。周波数の有効利用の観点からマイクロ波伝送の無線帯域と通信用無線帯域の共用を考えた場合、時間的に給電と通信を分離した動作（間欠動作）が必要となります。

図9に電波暗室の実験風景を示します。左側から 2.4 GHz のマイクロ波送電を行い、右のレクテナア

アンテナを有する無線 LAN 端末で受電するシステムです。無線信号とマイクロ波送電は間欠動作を行っており、センサ端末は、10.24 s おきに送信されるビーコンの受信タイミングの前後 2 s 以外はスリープさせています。図 10 の上はセンサ端末の消費電流の実測値であり、ビーコンの受信タイミングの前後で大きな消費電流が計測されています。図 10 の下は送電装置からの送電の有無の実測値であり、ビーコンの前後を除外して送電していることが確認できます。

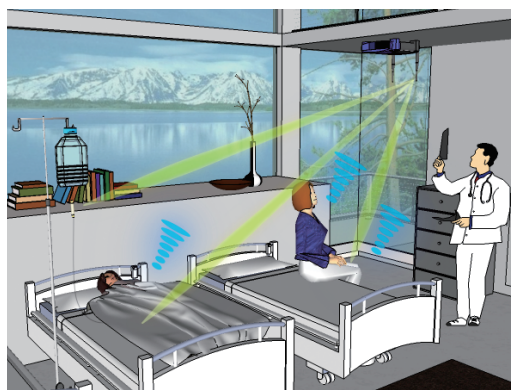


図 8 病院内の ENTERPRICE M2M システム

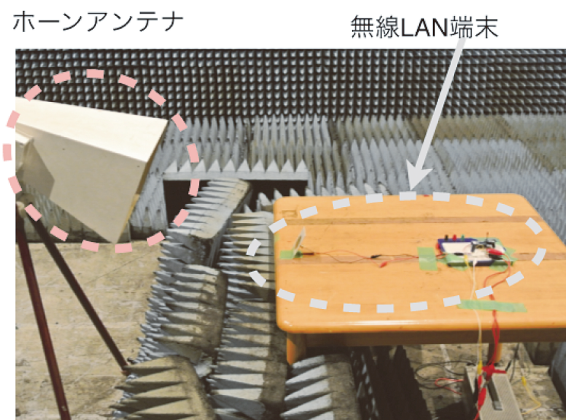


図 9 電波暗室内での実験風景

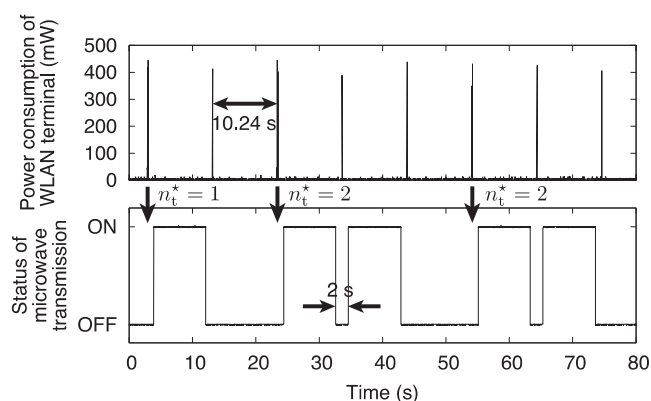


図 10 マイクロ波給電と通信のスケジューリング

#### 4. 今後の研究の方向性

エネルギー問題や環境問題、メディカルケアといった課題を解決する手段としてあらゆる物に通信機能を付け、機械と機械の通信を行うシステムの概要について述べました。国際的にも無線 LAN やセンサネットワークの標準化組織である IEEE 802.11ah にてタスクグループを形成し鋭意標準化が進められているところです。伝送速度は低速ながら 1 km 程度のセル半径で膨大なセンサ端末を信頼性高く、いかに簡易に管理運用を行うかが鍵となるでしょう。センサネットワークに対して世界各国の無線帯域が 920 MHz 帯で統一される状況で、通信規格も統一が図られると、無線 LAN と同様に広く普及することが期待されます。

また、マイクロ波伝送については太陽光発電や様々なエネルギーハーベスティング技術とともに、適材適所で研究開発が進められていくものと考えられます。