

# ZigBee と Bluetooth

横田 山都, 吉形 允晴

Yamato YOKOTA, Mitsuharu YOSHIKATA

## 1 はじめに

近年、いつでもどこでもネットワークに繋がることにより、人々の生活をより豊かにするユビキタス社会が注目されている。身の回りの至る物や場所にコンピュータが埋め込まれ、物と物、人と人、人と物が意識することなく接続されるネットワークが構築されつつある。そのため、身の回りには電子機器が溢れ、その機器を繋ぐ配線の数も増加した。

そこで、注目されているのが「無線化」である。無線化を行うメリットは、配線にかかるコストの削減やケーブルから解放される利便性の向上が挙げられる。ZigBee, Bluetooth も無線通信規格の一つである。

無線通信規格は、Fig. 1 に示すように通信距離によって大きく分類されている。Zigbee と Bluetooth は、人間一人が直接的な活動を示す範囲 (10m~20m) をカバーするワイヤレス PAN に属する。本報告では、Zigbee と Bluetooth の特徴および技術について述べる。

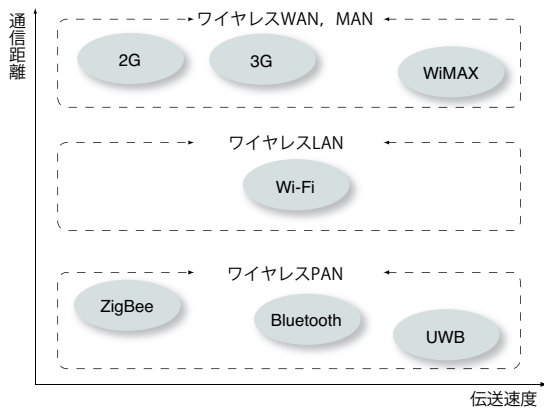


Fig.1 無線通信規格 (出典：自作)

## 2 Zigbee と Bluetooth の特徴

Zigbee と Bluetooth の仕様を Table 1 に示す。両規格は、同じワイヤレス PAN に含まれることから比較されることが多い。しかし、一つのネットワークに存在できるノード数や通信速度において大きな違いがあり、ネットワーク形態も異なる。ネットワーク形態に関しては 3 章で詳しく述べる。

Table 1 に示したように、両規格は 2.4GHz 帯を使用して通信を行っている。2.4GHz 帯は、多くの機器で使用されていることから電波干渉が問題となっている。また、ZigBee は電源からの無線化を目指しており、Bluetooth も小型機器への組み込まれることが多いため、電力消費

Table1 仕様一覧 (出典：自作)

	ZigBee	Bluetooth
通信方式	DSSS	FHSS
周波数帯域	2.4GHz(868/915MHz)	2.4GHz
ノード数	65,533 台	7 台
通信速度	250kbps	2.1Mbps

も大きな課題である。電波干渉回避、省電力動作の技術に関しては 4 章で詳しく述べる。

## 3 ネットワークトポロジー

ネットワークトポロジーとは、ネットワークの接続形態であり、各ノードがどのような形態で接続されるかを指す。ZigBee と Bluetooth では、異なる使用用途を想定しているため、ネットワークトポロジーも異なる。

### 3.1 ZigBee 通信のネットワーク

ZigBee は、一つのネットワークに 6 万台を超えるノードを接続でき、各ノードを中継器として使用するマルチホップ通信が可能である。そのため、ビルや、工場などで使用する「大規模センサネットワーク」の形成に利用されている。

#### 3.1.1 デバイスタイプ

ZigBee のネットワークトポロジーを構成するノードデバイスは、役割によって、ZigBee コーディネータ、ZigBee ルータ、ZigBee エンドポイントの 3 つの論理デバイスに分類される。また、ZigBee には「FFD (Full-Function Device)」と「RFD (Reduced-Function Device)」の 2 種類の物理デバイスが存在する。Table 2 に示すように、物理デバイスの種類により、選択できる論理デバイスが異なる。

Table2 ZigBee デバイスタイプによる違い (出典：自作)

	コーディネータ	ルータ	エンドポイント
ネットワークの立ち上げ	○	×	×
ルータ機能	○	○	×
ビーコン発行	○	○	×
管理範囲	すべてのノード	子ノード	自身
FFD	○	○	×
RFD	×	×	○

### 3.1.2 メッシュトポロジー

ZigBee の代表的なネットワークトポロジーは、Fig. 2 に示すメッシュトポロジーである。メッシュネットワークでは、ルータ機能を持つ FFD を配置することで、マルチホップ通信を行うことが出来る。そのため、1つのノードから見て電波が届かないノードまでデータを送信することができる。また、複数の経路が選択できるため、通信経路の冗長化も可能となる。

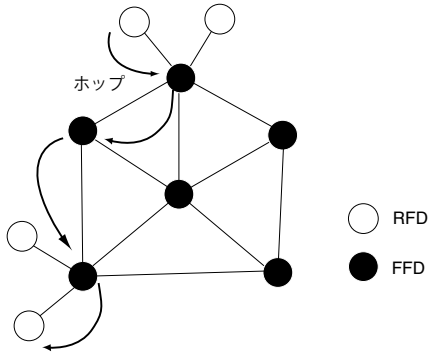


Fig.2 メッシュトポロジー (出典：自作)

ZigBee では、Fig. 3 に示すスター型やクラスターツリー型のネットワークを構築することも可能である。これらのネットワークを組み合わせることで状況に適したネットワークトポロジーを構成することが出来る。

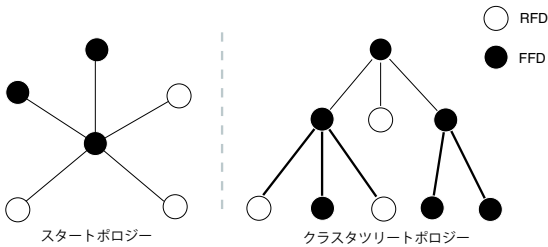


Fig.3 スター・クラスターツリートポロジー (出典：自作)

### 3.1.3 ルーティング

ZigBee には、テーブルルーティングが用いられており、その経路選択アルゴリズムとして「AODV」が採用されている。

AODV は、すべての経路にパケットを送信し、目標のノードに最小のコストで到達したパケットの経路を通信経路として採用する。通信路の選択基準であるコストは、ホップ数が少なく、通信品質が高い経路ほど小さい値となる。

## 3.2 Bluetooth 通信のネットワーク

Bluetooth は、コンピュータ市場、携帯電話市場、自動車市場などの異なる産業間における「統一規格による手軽な無線接続」を目的としている。そのため、2台のデバイスが一定の範囲内に近接すると、通信リンクが確立し Fig. 4 に示すようなピコネットが自動的 formation される。通

信が確立されると、一方がマスターとなり、もう一方がスレーブとなる。通信は、必ず、マスター経由で行われ、スレーブ同士が直接通信は行わない。

### 3.2.1 ピコネット

Bluetooth では、通常は接続を開始したデバイスがマスターを担うが、デバイスはどちらの立場にもなることが出来る。マスターは、ピコネットを形成し最大 7 台のスレーブと同時に通信することができる。

ピコネットは必要に応じて動的に形成され、参加デバイス同士が通信を必要とする限り存続する。あるデバイスが複数のピコネットに参加すると、それらのピコネットは「スキヤッタネット」と呼ばれる複数のピコネットが接続されたネットワークを形成する。

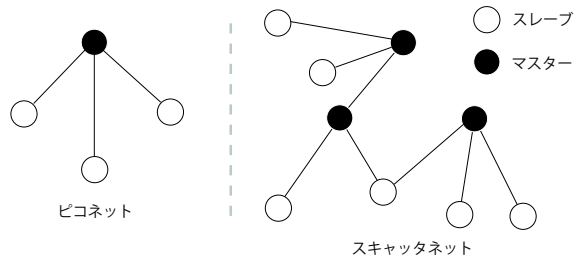


Fig.4 ピコネット・スキヤッタネット (出典：自作)

### 3.2.2 通信リンクの確立

Bluetooth 機器間で通信を行う際には、通信状態へ移行する必要がある。スタンバイ状態 (未接続状態) から接続状態への移行には、Fig. 5 に示すように、照会、呼び出し作業を行う。照会では、周囲にあるデバイスの身元を認識する。この時、他のデバイスは照会を待ち受け、応答しなければならない。照会により Bluetooth アドレスとクロック値を取得すると呼び出し状態へと移行する。呼び出しでは、マスターが対象のデバイスをスレーブとしてピコネットに参加させる。

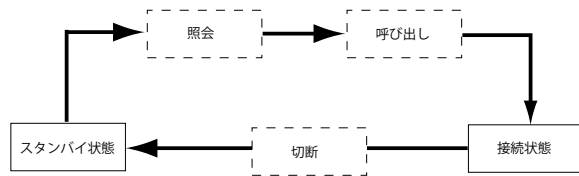


Fig.5 接続のフロー (出典：自作)

初めて接続を行う場合は Fig. 5 に示す「呼び出し」において、ペアリングと呼ばれる相互認証作業が必要となる。v2.1 からは、「Secure Simple Pairing<sup>\*1</sup>」が導入されペアリングの簡略化が行われた。

<sup>\*1</sup> ペアリングするデバイスに同じ 6 桁の番号が表示されていることを確認することで認証を行う。

### 3.2.3 プロファイルと SDP

Bluetooth の特徴は、いつでも通信を開始し、各デバイスが提供するサービスを相互に利用できることである。Bluetooth には、各サービスごとに、どのような順番・タイミングで、どんな種類の情報を転送すべきか、という手順を製品の特性ごとに標準化した「Bluetooth プロファイル」と、通信相手の持つサービス（プロファイル）を知ることが出来る SDP（Service Discovery Profile）が実装されている。そのため、Fig. 6 で示す様に、動的にデバイスによって提供されるサービスを発見して、お互いが対象サービスを保有している場合、通信を行うことが出来る。

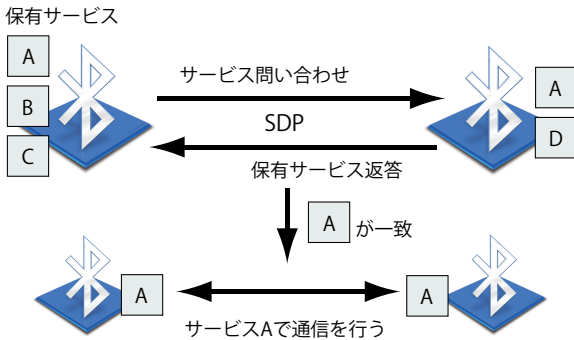


Fig.6 SDP とプロファイルによる通信 (出典：自作)

## 4 電波干渉回避と省電力動作

### 4.1 電波干渉回避技術

ZigBee と Bluetooth は、2.4GHz ISM 帯 (Industry Science Medical band) で動作する。2.4GHz 帯は、国際的な取り決めにより何処の国でも免許不要で利用できる。無線 LAN や HomeRF、電子レンジも同周波数帯を使用する。そのため、無線規格同士での干渉が問題となっている。その対策として、電波干渉回避に、ZigBee では、直接スペクトラム拡散 (DSSS:Direct Sequence Spread Spectrum)、Bluetooth では、周波数ホッピングスペクトラム拡散 (FHSS:Frequency Hopping Spread Spectrum) のスペクトラム拡散方式を採用している。

#### 4.1.1 DSSS

DSSS では、送信側では送信データに対して拡散符号による演算を行い、送信データよりも広い帯域にエネルギーを拡散して送信する。受信側は、逆拡散符号を作り送信データを復号する。そのため、拡散された帯域の一部にノイズが混入した場合も Fig. 7 で示すように、ノイズが拡散されて影響を最小限にとどめられる。また逆拡散符号によって復号演算を行わなければノイズにしか聞こえず、拡散符号が判らなければ通信を傍受できないので通信の秘匿性にも優れているとされる。

ZigBee では、2.4GHz 帯 (2402~2480MHz) を 16 のチャンネルに分割して通信を行う。1つのチャンネルは 2MHz を占有し、隣り合うチャンネルの中心周波数間隔は 5MHz であるため、理論的には、一度に 16 チャンネ

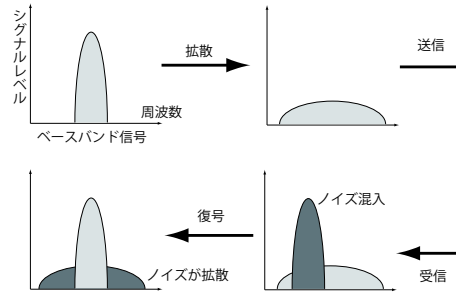


Fig.7 DSSS におけるノイズの拡散 (出典：自作)

ルすべてを使用しても干渉を起こさない。

#### 4.1.2 FHSS

FHSS は、Fig. 8 に示すように、ある一定の周期で搬送波の周波数を切り替えて (ホッピングして)、通信を行うというものである。これにより、干渉する周波数を発生する機器が周囲に存在していても、その影響を極力少なくすることができる。また、疑似ランダムによりホッピングしていく周波数を推測したり、追跡することは困難であることから秘匿性にも優れている。

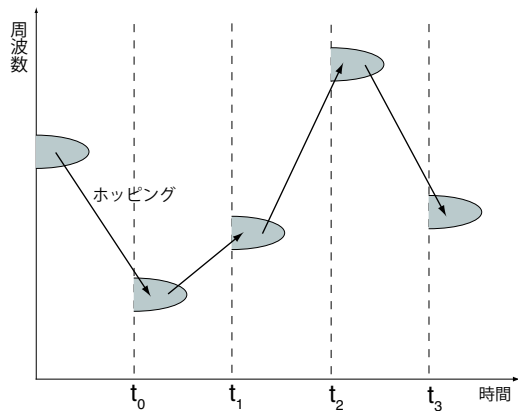


Fig.8 FHSS のホッピング (出典：自作)

Bluetooth では、2.4GHz 帯 (2402~2480MHz) の中に 1MHz ごと、79 個のチャンネルを設定し、1 秒間に 1600 回のホッピングを行い通信する。802.11b/g 無線 LAN も同周波数帯域を使用しており、その最大チャンネル帯域幅は、22MHz である。そのため、Bluetooth と無線 LAN が同時に通信を行うと 28% の衝突が発生することになる。

そこで、v1.2 では、FHSS を拡張した AFH (Adaptive Frequency Hopping) が導入された。AFH では、ホッピングするチャンネルを最大 20 個まで減らすことで電波干渉を回避する。

### 4.2 省電力動作技術

消費電力と通信距離は比例関係にある。しかし、両規格では通信距離よりも省電力化に重きを置いている。省電力化方法には、大きく分けて「適応送信電力\*2」と「通

\*2 受信信号強度を使用して通信に必要な最適出力に調整する。

信時間の短縮」の2つがある。最適な出力の選択、通信時間の短縮は、消費電力の低下だけではなく、電波干渉を軽減することにも繋がる。

#### 4.2.1 ZigBee

ZigBeeが対象としているアプリケーションでは、通信頻度が低いものが多い。つまり、受信待ち受け状態の時間が非常に長い。そこで、Fig. 9に示すスーパーフレームを導入し、アクティブ期間とインアクティブ期間に分けたピーコン信号に同期して通信することで、間欠の動作による省電力化を図っている。

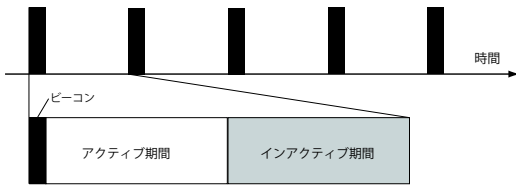


Fig.9 スーパーフレーム (出典：自作)

#### 4.2.2 Bluetooth

Bluetoothのスレーブデバイスには、「アクティブ」「スニッフ」「ホールド」「パーク」と呼ばれるベースバンドモードが定義されている。これらのモードは、消費電力を抑えると同時に近接する領域に出来るだけ多くのデバイスを共存させることができる。各ベースバンドモードごとの動作をTable 3に示す。

Table3 ベースバンドモード (出典：自作)

モード	説明
アクティブ	常にマスタからのパケットを監視する。
スニッフ	設定されたインターバルごとにマスタを監視する。
ホールド	一定のホールド時間を決め、その間マスタとのリンクは静止状態となる。その間は、スリープや他の機器との接続を行うことが出来る。
パーク	マスタとの同期は維持するがアクティブスレーブとは見なされない。

モードによる違いはマスタからのパケット監視間隔であり、Fig. 10に示す様に、監視サイクルが長いほど省電力である反面、応答速度が低下する。



Fig.10 消費電力と応答速度の関係 (出典：自作)

Bluetoothでは、間欠動作での省電力化の他にも、v2.0で導入された高速通信化技術である EDR (Enhanced Data Rate) を使用することで、接続時間の短縮を行い消費電力を減少させることが出来る。EDR パケットでは、これまでの GFSK 変調だけでなく、QPSK を使用することで、ビット数/シンボルが 2~3 倍になり、2Mb/s( $\pi/4$ DQPSK 変調<sup>\*3</sup>) と 3Mb/s(8DPSK 変調<sup>\*4</sup>) のピーク・データ・レートが実現できる。

## 5 今後の展望

Bluetooth SIG は、ノキアが推進していた近距離無線規格「Wibree」を傘下におさめ、The WiMedia Alliance が推進する UWB (Ultra Wide Band: 超広帯域通信) 規格「マルチバンド OFDM」を現行の Bluetooth に統合すると発表している。その二つの技術を統合することで、数 100Mbps の高速通信に対応した Bluetooth 規格および、ボタン電池で動作する超低電力 (ULP: Ultra Low Power) の規格策定を行っている。

また、最新バージョンである v3.0<sup>\*5</sup>では、Alternate MAC / PHY により、通常は消費電力の低い従来の Bluetooth で機器間の連絡を取りつつ、大量のデータ通信が必要となったときは、シームレスに 802.11 無線 LAN を使つての転送が可能となった。

この様に、Bluetooth は、様々な無線技術を取り込みながら、「Bluetooth は機器同士で簡単に通信できる」という最大の利点を生かしながらも、速度と消費電力のバランスを取れた無線通信となると考えられる。

一方、ZigBee は日本での認知度は低いものの米国では大きなマーケティング努力がなされ、過去数年間、無線センサーネットワークでは最も高い認知度を得ている。今後の ZigBee 普及のキーワードは「自動計測 (AMR)」と「スマートエネルギー」ではないだろうか。ARM では、電気やガス、水道のメーターに ZigBee を組み込み、自動でデータ収集を行うことで、大幅な人件費の削減が期待されている。また、「エコクーラー」や「エコカー」など、最もコスト効率が高く、寿命の長い製品を使うというスマートエネルギーの考え方が社会に浸透してきており、低消費電力である ZigBee の採用が進んでいくと考えられる。

## 参考文献

- 1) 鄭立, ZigBee 開発ハンドブック, 土岡正純, 2006
- 2) 阪田史郎, ZigBee センサーネットワークへ通信基盤とアプリケーションへ, 秀和システム, 2005
- 3) 清野幹雄, Bluetooth テクノロジーへの招待, 三輪幸男, 2002
- 4) Bluetooth.com  
<http://japanese.bluetooth.com/Bluetooth/>
- 5) 5分で絶対に分かる ZigBee  
<http://japanese.bluetooth.com/Bluetooth/>
- 6) IrDA, Bluetooth を反面教師にした ZigBee の実力は?  
<http://www.atmarkit.co.jp/fnetwork/column/narumono04/01.html>

<sup>\*3</sup> QPSK の位相を 45 度ずらして、振幅変動を小さくしたもの。

<sup>\*4</sup> 位相のずれた複数の波の組み合わせで情報を表現するデジタル変調方式 PSK の実装方式の一つ。

<sup>\*5</sup> 仕様の発表は、2009/4/21 に予定されている。