

平成19年度
研究開発成果報告書

ZigBee を利用したユビキタスネットワーク
技術の研究開発

沖電気工業(株)

平成20年4月

情報通信研究機構

平成19年度 研究開発成果報告書 (一般型)

「ZigBee を利用したユビキタスネットワーク技術の研究開発」

目 次

1	研究開発課題の背景	2
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	3
2-2	研究開発目標	6
2-2-1	最終目標	6
2-2-2	中間目標	7
2-3	研究開発の年度別計画	8
3	研究開発体制	9
3-1	研究開発実施体制	9
4	研究開発実施状況	
4-1	無線ノード開発	10
4-1-1	開発内容	10
4-1-2	実施状況	10
4-1-3	達成状況	14
4-2	技術方式開発	15
4-2-1	開発内容	15
4-2-2	実施状況	15
4-2-3	達成状況	32
4-3	実証実験	32
4-3-1	実施内容	32
4-3-2	実施状況	32
4-3-3	達成状況	44
4-4	総括	44
5	参考資料・参考文献	45
5-1	研究発表・講演等一覧	45

1 研究開発課題の背景

人やモノを始めとして、様々な対象・場所に小型の無線ノードを遍在させ、それらに搭載したセンサが集める情報を交換し、無線ノードを通じてあらゆる機器を制御することで、新しい機能・サービスを提供するという、ユビキタスセンサネットワークの実現が望まれている。総務省「ユビキタスセンサネットワーク技術に関する技術調査会」の最終報告でまとめられているように、ユビキタスセンサネットワークは、近距離低レート低消費電力低コストの無線ノードが無数に設置され、自律的にアドホックネットワークを形成するものである。「安全・安心」「快適・ゆとり・娯楽」「最適・効率」をキーワードとして、多くの分野での応用アプリケーションが期待されている。

ユビキタスセンサネットワークの研究は、欧米で軍事向けとして始まったものが多いが、日本でも民生向けの研究開発が取り組まれている。大学を中心にさまざまな無線ノードが開発され、それを使用したプロトタイプの実験が行われている。無線の方式やネットワークキングの方式も千差万別であり、その上に実装されるセキュリティ機能やアプリケーションなども多岐にわたっている。

これらの無線ノードを各企業が独自に開発しては、実用化に向けた課題を解決するために多くの時間と工数を要してしまう。また、将来インフラとして普及させていくためには、相互接続性の確保も必要となる。そこで、当然ながら標準化という方向性が重要となる。

ユビキタスセンサネットワークに対する技術的要求はさまざまであるが、多数のノードをいろいろな場所にばら撒いて設置するというを実現するためには、低コスト、低消費電力という課題は必須となる。この要求項目を重視して取り組まれた標準のひとつが ZigBee である。ZigBee はユビキタスセンサネットワークを実現する無線ネットワーク方式として、有力な方式といえる。

ZigBee は、ZigBee Alliance という世界各国の企業の連合からなる団体に規定された方式であり、デファクトスタンダードを目指している。無線の物理(PHY)レイヤと MAC レイヤは国際標準である IEEE802.15.4 を使用しており、ネットワークレイヤでのルーティング方式やセキュリティ方式などを規定している。また、相互接続性を高く保証するために、アプリケーションごとにプロファイルを定めて、そのインタフェースや利用する技術を規定している。

ZigBee は、2004 年に初版(ZigBee 1.0)が規定され、その後、2006 年、2007 年にそれぞれ ZigBee-2006、ZigBee-2007 としてバージョンアップされている。これらの規格に合わせた無線部の LSI や実験用の無線装置がメンバ各社で開発されている。

ZigBee 1.0 は、基本セットを優先して規格化を進めてきたため、実用化に向けて必要な技術方式のいくつかが不足していた。ZigBee-2006、ZigBee-2007 で改良や機能追加が行われており、今後も改良検討が続けられている。ZigBee で対応できていない技術を標準外の周辺技術として補いながら、標準化を推進していくことが重要である。

また、ZigBee は無線ノードの技術は規定されているが、それらを利用したバックボーン側のシステムの規定も十分ではない。ユビキタスセンサネットワークを利用してシステムを構築しようとする企業は、必ずしも無線の技術を有しているわけではなく、既存のシステムとセンサネットワークをどのように接続してよいかわからない。そこで、普及のためには、共通プラットフォームとなるシステムの開発も必要であり、標準化を進めていくことが重要となる。

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

ZigBee の普及を促進するために、以下の開発を行う。

- ① ZigBee 規定に準拠した無線ノードの開発(ハードウェア、ファームウェア)
- ② ZigBee 規定に不足する技術を補うための技術方式開発
- ③ 開発成果を評価するための実証実験

以下にそれぞれ詳細な開発内容を記載する。

ア 無線ノード開発

ZigBee 1.0 やそれ以降のバージョンに準拠した無線ノードを開発する。無線ノードは建物などに設置する固定ノードと、人やモノにつける移動ノードでは、要求項目が異なるため、それぞれ適切なノードを数種類開発することになる。また、その中でも、ルーティング機能やネットワーク管理機能を持つノード(ZigBee ルータや ZigBee コーディネータと呼ばれる)など、持つべきネットワーク機能も多様である。

また、アプリケーションごとに要求機能やコスト(価格)も異なるため、本来は、アプリケーションごとの最適設計を行うのが理想であるが、開発効率やコストパフォーマンスも考慮し、共通化を行う。さまざまな応用分野に適応可能とするために、共通項目を抽出し、汎用的なモジュールで構成した部分と、アプリケーションごとの要求に依存する個別モジュールで構成する部分を、整理して設計する必要がある。ただし、汎用性を持たせるために、搭載機能が冗長になり、高コスト、高消費電力になってしまうと、本来の目的から外れる。実用面と開発効率面を考慮したノードの開発を行う。

無線ノードのラインナップがある程度揃ってくれば、アプリごとに必要な機能を持つ無線ノードを組み合わせてネットワークを構築することができ、システム設計が容易になる。本提案では、そのような汎用な基本無線ノードを数タイプ開発することを目標とする。

開発する代表的なタイプは、大きく分類して以下の 3 とおり。

① 他の機器に挿入する携帯ノード(タイプ A)

PDA や携帯電話、小型のノート PC など、既存の携帯機器と一緒に動作する無線ノードを開発する。具体的には、USB や SD カード、携帯電話インタフェースなど、代表的なインタフェースを持つ無線ノードをそれぞれ開発する。電源は、携帯機器から供給を受けることを基本とし、アプリケーションソフトウェアも携帯機器側の CPU で動作させることを考える。そのため、無線ノードに搭載するマイコンは、ネットワーク機能までを動作させればよいため、低コスト化が実現できる。

携帯ノードであるため、基本的にはルーティング機能を持たない ZigBee エンドデバイスタイプで構成する予定であるが、必要に応じて、ルーティング機能を持つ ZigBee ルータータイプで構成することもある。例えば、携帯電話を中心に、音楽再生機器やゲーム機、各種生体センサ搭載ノードなどが、ツリー構造でぶら下がることも考えられる。

最終的には、携帯機器内に組み込むモジュールにすることが目標であり、ZigBee 一体型の携帯機器を開発・事業化することを目指す(これは、本提案の目標外とし、終了後に取り組む)。

② ルーティング機能を持つ固定ノード(タイプ C)

建物などに設置するタイプであり、電源が取れていることを基本とする。ただし、街中の街灯など、AC 電源を確保するのが困難な場所への設置も考えられるため、電源は太陽電池等の電源を利用する構成も検討する。ルーティング機能を持ち、設置した複数のノー

ド間でマルチホップの通信を行う。マイコンは高機能なものを搭載し、メモリ容量も大きくする。設置場所に制限を与えないためには、できるだけ小型であることも重要となる。

③ゲートウェイ機能を持つ固定ノード(タイプD)

タイプCに、IPや他の専用プロトコル間を変換するGW機能を追加して持つ。その他の機能はタイプCと同等と考える。他のプロトコルとして、IPに変換するゲートウェイの試作は必須目標と考える。

イ 技術方式開発

ZigBeeでは、固定的に設置した無線ノードを対象として規定されているなど、実用に向けてはいくつかの技術的な不足がある。そこで、以下のような技術を開発する。

- ① 移動ノードに対応する機能
- ② 無線ノードの故障時に、ルートを再設定する技術
- ③ スリープ制御と省電力化の向上
- ④ 無線LANとの連携
- ⑤ 実用化に向けた、新しいプロファイルの規定

これらの技術は、従来でも研究されてきている方式でもあるが、ZigBeeに準拠させながら動作することが必須となるため、従来手法をそのまま利用することができず、新規の開発となる。

以下に、それぞれの課題の概要を説明する。

① 移動ノード対応機能

ZigBeeでは、クラスタツリールーティング方式を規定し、マルチホップルーティングでの省電力と省メモリを実現している。

IETFなどで標準化が進められている従来のマルチホップルーティング方式では、大きく2種類の手法に分けることができる。1つは、通信する際に受信ノードがどこにいるかを探索して、マルチホップルートを設定する「オンデマンド型ルーティング」であり、もう1つは、予め周囲のノードの場所を記憶したリストを用意しておき、それにしたがってルートを判断する「プロアクティブ型ルーティング」がある。オンデマンド型はリストを記憶しておく必要がないため、メモリ容量は少なくすることができるが、通信のたびにルート探索を行うため、通信のオーバーヘッドが大きい。一方、プロアクティブ型は、ルートは既にわかっているためオーバーヘッドは少ないが、周辺のノード数が多くなるにつれ、リストのメモリ容量が大きくなる。

これらの従来手法に対して、ZigBeeでは、通信オーバーヘッドが少なく、メモリ容量もほとんど必要としない「クラスタツリールーティング方式」を規定している。各ノードはツリー状のトポロジーで接続され、どのノードの下にぶら下がっているかによって、各ノードが一意に決まるルールでID(ネットワークアドレス)を付与される。また、他のノードのIDと自分のIDをある式に入力して比較することで、それが自分より上にいるのか下にいるのか、判断できるようになっている。

ただし、ツリー状に接続されて、IDを割り当てておくことが必要であるため、移動ノードへの対応が柔軟にできないという欠点がある。ノードの追加・削除の仕組みは規定されているため、ツリーの枝を渡り歩くような移動ノードに対して、ノードの追加・削除を繰り返すことで、接続を確保することは可能であるが、枝に接続するたびに異なるIDが割り当てられるため、同じノードであると認識することができない。

そこで、これらの課題を解決するような以下のような機能を、本提案で開発する。

- ・ 移動ノードに動的に同じ ID を付与する機能、または異なる ID を付与する場合にそれを同定する機能
- ・ ルータ間を移動(ハンドオーバー)できる機能

② 故障対応機能

ZigBee では、ツリー形状でトポロジーが固定されて各ノードが結びついているため、どこかの幹のノードが故障した場合、そこから下のノードへの通信ができなくなる。これも、ノードの追加・削除機能を繰り返して、接続することは可能であるが、元の ID が維持できないため、ネットワーク管理側で混乱が生じる。また、どの枝につなぎなおせばよいかを判断する仕組みは、ZigBee では規定していない。

そこで、本提案では、故障時の以下のような機能を開発する。

- ・ 故障したノード以下のツリーを、最適な場所に再接続する機能
- ・ 元の ID と新しい ID を同定する機能

③ スリープ制御

ZigBee では、省電力を考慮した工夫が多く取り入れられているが、その多くは、ツリーの葉となる「エンドノード」に対して規定されている。例えば、通信制御の仕組みとして、帯域保証を行う GTS(Guaranteed Time Slot) 方式が規定されており、エンドノードは割り当てられたスロットで通信を行い、それ以外のスロットでは、機能を停止した「スリープ状態」になることで省電力を向上させる。ただし、ツリーの幹に当たる「ルーターノード」はエンドノードとの通信の間はずっと起動しておく必要があり、省電力効果は少ない。ただし、GTS で割り当てるタイムスロットを隣のルーターノードとぶつからないようにする必要があり、隣のルーターノードのスロットの間にスリープすることは可能である。これを実現するためには、隣のルータとスロット割り当てのネゴシエーションを行う必要があるが、ZigBee ではその仕組みは規定範囲外となっている。

そこで、本提案でスロット割り当ての仕組みとルータのスリープ制御の機能を実現する。

④ 無線 LAN との連携

ZigBee は、センシングした短いデータを集めたり、制御ノードへ簡単なコマンドを送ったりすることを目的とした低レベルの無線ネットワーク方式であり、通信レートも 250kbps と非常に低い。このようなネットワークを例えばビル全体に敷設する場合、数千から数万のノードで構成する必要があるが、マルチホップ数が増えるにつれ、中継すべきデータが増え、上位ノードの負荷は重くなる。したがって、あまり多くのノードからなるネットワークをすべて ZigBee で実現することは困難である。そこで、少数のノードからなる PAN(Personal Area Network)を、GW(Gateway)を介してバックボーンネットワークにぶら下がる構成をとるのが普通である。

ただし、このような構成にした場合、隣の PAN との連携をバックボーンネットワーク経由で行う必要があり、ノード間の連携を柔軟に実現することが難しくなる。

また、バックボーンネットワークとしては、普及が加速的に向上している無線 LAN が候補となるが、無線 LAN のメッシュ網化(アドホックネットワーク化)も開発が進められているため、その網との連携も必要になる。

さらには、無線 LAN と ZigBee は、日本では同じ 2.4GHz 帯を使用するため、効率的な通信制御も必要となる。

そこで、本提案では、無線 LAN と ZigBee を融合させ、最適なネットワークを開発する。

⑤ 新しいプロファイル

ZigBee では、相互接続性を高めるため、応用用途ごとに利用する機能やパラメータの範

囲を詳細に定めるプロファイルを規定している。例えば、家庭内の照明用プロファイル (Home Control Lighting Profile) などが規定されている。現在、代表的な応用分野でプロファイル検討を行なっているが、すべての分野で規定することは困難であり、また、企業ごと、国ごとの条件や規制に対応したものにすることは難しい。そこで、ZigBee では、「プライベートプロファイル」として、企業ごとに独自のプロファイルを規定しても良いルールを設けている。

ZigBee では、日本企業の活動がそれ程アクティブではないため、日本の規制や条件を考慮したプロファイル検討が遅れている。本提案では、日本で利用する際に必要な条件を考慮した日本向けプロファイルを検討し、普及するように、他の企業も巻き込んだ実証実験を行う計画である。必要に応じて、検討したプロファイルは日本提案として ZigBee への提案活動も実施していきたい。

ウ 実証実験

上述の課題ア、イで開発した無線ノードと技術方式の有効性を確認するために、京都市において実フィールドで実証実験を行う。

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標 (平成20年3月末)

ア 無線ノード開発

① タイプ A

PDA に挿入できる SD カードインタフェース、携帯電話に挿入できるインタフェース、ノート PC などに挿入できる USB インタフェースを持つノードをそれぞれ開発する。特に、小型化や低消費電力化、品質/剛性向上を目指すため、それぞれのタイプを数回、設計/製造を繰り返し、成熟度を高める。

アンテナ部を装置の外側に出す必要もあり、本体装置からはみ出る部分が存在するが、そのサイズは 5cc 以下となることを目指す。

電池寿命は、本体装置の消費電力に大きく依存するが、ZigBee を動作させることで、本体の動作寿命が 80% 以下にならないことを目標とする。

② タイプ C

AC 電源で動作することを基本とするが、小型の太陽電池で動作するタイプも開発する。サイズは、50cc 以下を目指す。

③ タイプ D

IP プロトコルとの変換 GW を持つタイプを開発する。IP 以外のプロトコルへの変換も必要により開発する。

イ 技術方式開発

① 移動ノード対応

移動ノードを持って、人が歩くスピードで固定ノード間(10m 間隔)を通り過ぎる場合、遅延なく ID が切り替わり、データ通信が途切れないことも目標とする。

② 故障対応

ツリーの幹のノードが故障した場合、1 分以内にトポロジーを再構築し、ネットワークが安定動作することを目標とする。

③ スリープ制御

ルーターノードの消費電力が、方式を適用しない場合と比較して 10% 以下になることを目標とする。

④ 無線 LAN との連携

メッシュルーティングが動作する無線 LAN 網と、GW やブリッジで ZigBee 網が接続し、1000 ノードで安定したネットワークを開発する。

⑤ プロファイル

3 つのアプリケーションに適したプロファイルをそれぞれ検討し、ZigBee Alliance に対して、プライベートプロファイルとして認証を得る。

ウ 実証実験

京都市において屋外無線 LAN と ZigBee を連携させた実証実験を実施する。実証実験は「まちの防犯」アプリケーションへの適用を想定し、携帯ノード保持者があらかじめ設定された危険区域に近づいたり、特定区域から出入りしたりした際に、携帯ノード保持者に警告メッセージを送出するとともに、監視者に通知メッセージを送出する機能を実現する。

2-2-2 中間目標（平成19年1月末）

ア 無線ノード開発

① タイプ A

SD カードタイプ、携帯電話タイプ、USB タイプを 1 回ずつ開発し、品質向上を目指すための課題を整理する。

サイズは 20cc 以下を目指す。

電池寿命は、ZigBee を動作させることで、本体の動作寿命が 80%以下にならないことを目標とする。

② タイプ C

AC 電源で動作するタイプを開発する。

サイズは、100cc 以下を目指す。

③ タイプ D

IP プロトコルとの変換 GW を持つタイプを開発する。

イ 技術方式開発

① 移動ノード対応

移動ノードを持って、人が歩くスピードで固定ノード間(30m 間隔)を通り過ぎる場合、遅延なく ID が切り替わり、データ通信が途切れないことも目標とする。

② 故障対応

ツリーの幹のノードが故障した場合、5 分以内にトポロジーを再構築し、ネットワークが安定動作することを目標とする。

③ スリープ制御

ルーターノードの消費電力が、方式を適用しない場合と比較して 50%以下になることを目標とする。

④ 無線 LAN との連携

メッシュルーティングが動作する無線 LAN 網と、GW やブリッジで ZigBee 網が接続し、100 ノードで安定したネットワークを開発する。

⑤ プロファイル

1 つのアプリケーションに適したプロファイルの検討に着手する。

ウ 実証実験

実証実験場所を特定するとともに、実証実験システムの設計を完了し、無線ノードへのアプリケーションを実装する具体的作業が開始可能な状態にする。

2-3 研究開発の年度別計画

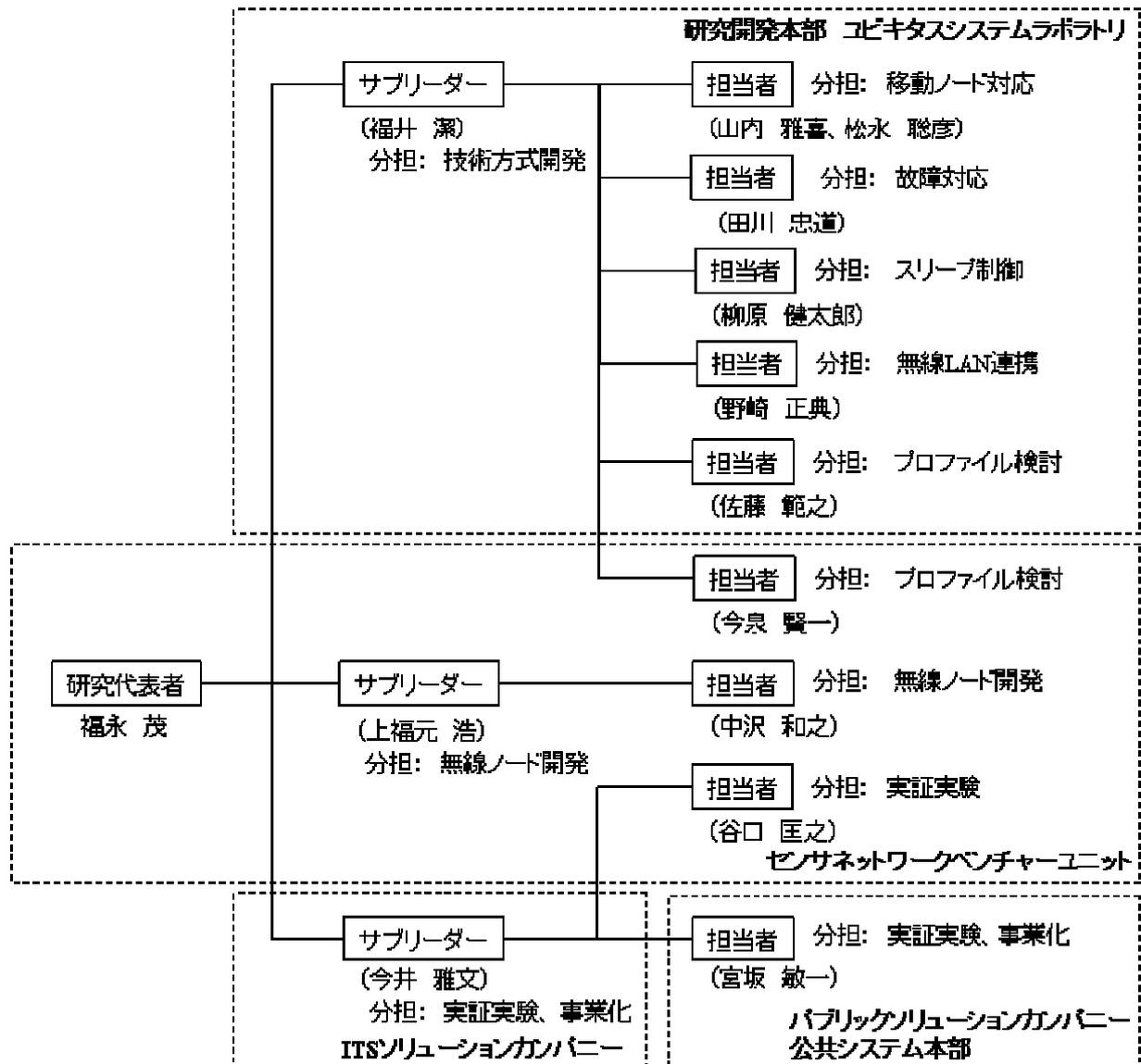
金額は非公表

研究開発項目	17年度	18年度	19年度	年度	年度	計	備考
ア 無線ノード開発	-	-	-			-	
① タイプA	SD版開発	USB版、携帯版開発	システム連携・改良				
② タイプC		開発・評価					
③ タイプD	Ether版、シリアル版開発						
イ 方式開発	-	-	-			-	
① 移動ノード対応	基本アイデア検討	方式検討・評価	方式改良・システム上での評価				
② 故障対応							
③ スリープ制御							
④ 無線LAN連携							
⑤ プロファイル	プロファイル基本要件整理	提案活動	新プロファイル標準化				
ウ 実証実験	-	-	-			-	
	実験内容基本検討	内容精緻化、予備実験システム開発	予備実験実施、本格実験システム開発・実施				
間接経費	-	-	-			-	
合計	-	-	-			-	

- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。
 2 備考欄に再委託先機関名を記載
 3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



4 研究開発実施状況

4-1 無線ノード開発

4-1-1 開発内容

以下の3タイプのZigBee無線ノードを開発する。

- ① タイプA：他の機器に挿入する携帯ノード
- ② タイプC：ルーティング機能を持つ固定ノード
- ③ タイプD：ゲートウェイ機能を持つ固定ノード

4-1-2 実施状況

① タイプA

タイプAとして、以下の3つのインタフェースを持つZigBeeノードを開発した。

- (あ) SDカードインタフェース
- (い) USBインタフェース
- (う) μ SDインタフェース（携帯電話接続）

(あ) SDカードインタフェース

SDカードインタフェースを持つZigBeeノードを開発した。SDインタフェースの規格はSDIO1.0を採用し、PDAのドライバとして、YRPユビキタス・ネットワーキング研究所のユビキタス・コミュニケータ（UC）と、Windows Mobile採用PDAを対象として開発した。



図1 SDカードインタフェースのZigBeeノード（左）と同カードを実装したユビキタスコミュニケータ（右）

SDインタフェースZigBeeノードに実装するソフトウェアは図2の構成をとっており、PDA等のアプリケーションからZigBeeの制御が可能な構成となっている。

インタフェース・機能については、良好であるが性能面で向上の余地があること、および抜けやすいなど実装上の課題が見つかった。

消費電流に関しては、アクティブ動作時100mAであり、一般的なPDAの消費電流300mAと同時に利用すると75%になり、目標値をクリアした。

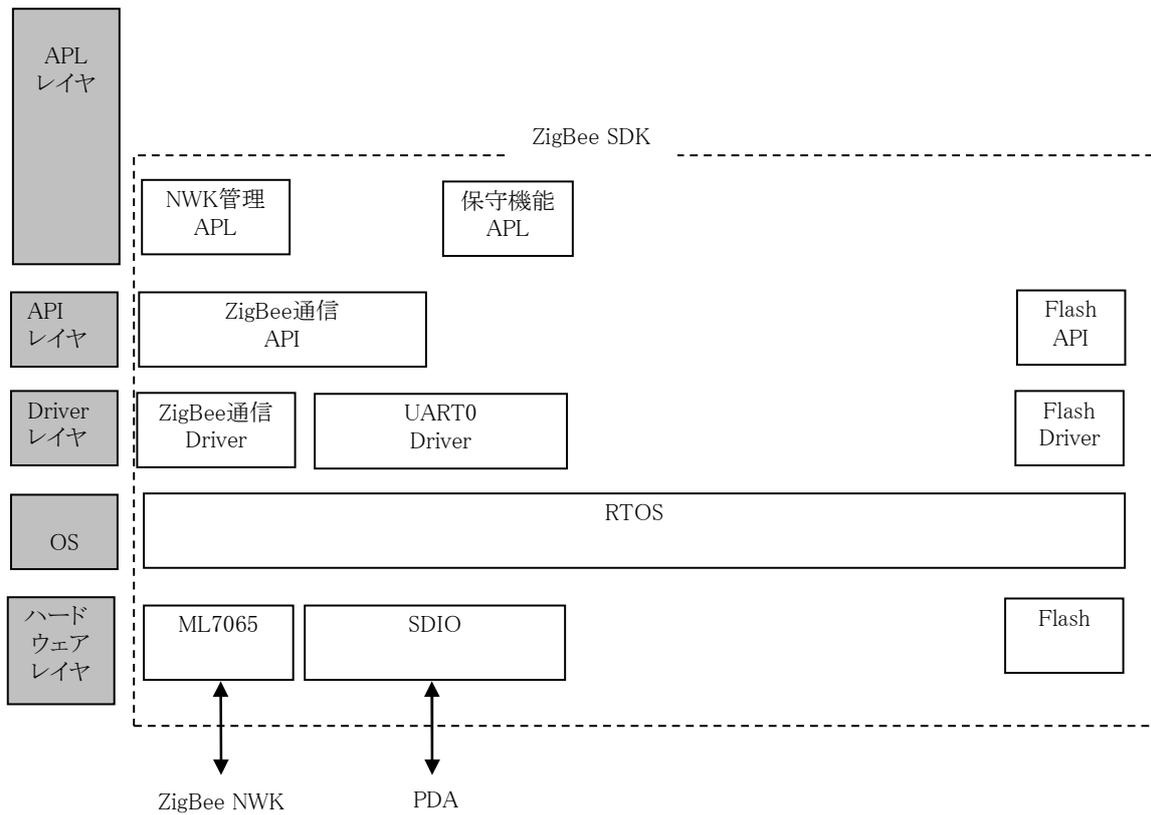


図2 SDIO ソフトウェア構成

(い) USB インタフェース

USB インタフェースを持つ ZigBee ノードを開発した。本ノードは Windows PC と USB 2.0 のインタフェースを介して、PC 上のアプリケーションから ZigBee 通信を行うものである。構成図とプロトコルスタックを以下に示す。



図3 USB インタフェース ZigBee ノード

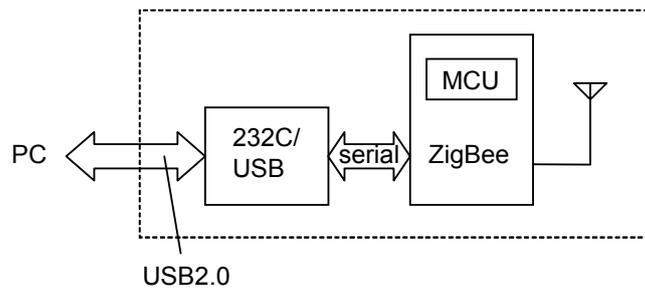


図4 USB インタフェース ZigBee ノードの構成図

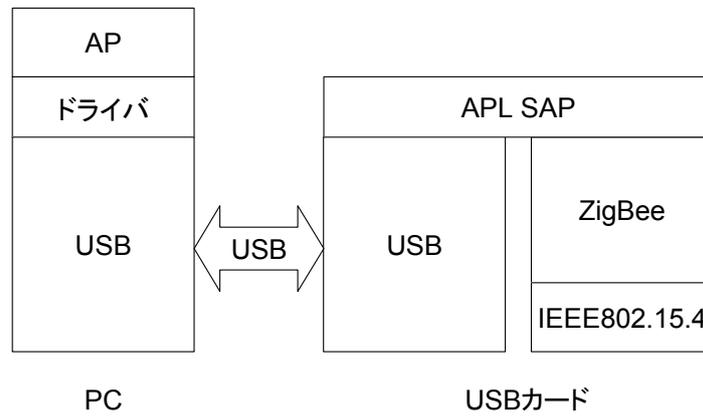


図5 USB インタフェース ZigBee ノードのプロトコルスタック

AP からの送信データ、送信コマンドをドライバに渡すと、PC 上のドライバで USB インタフェースを介した転送を行い APL SAP にデータが渡される。ZigBee スタックで、コマンドを解釈し、通信プロトコルに従って送信が行われる。受信の場合も同様のルートを経由する。

(う) μ SD インタフェース (携帯電話接続)

μ SD インタフェースを持つ ZigBee ノードを開発した。

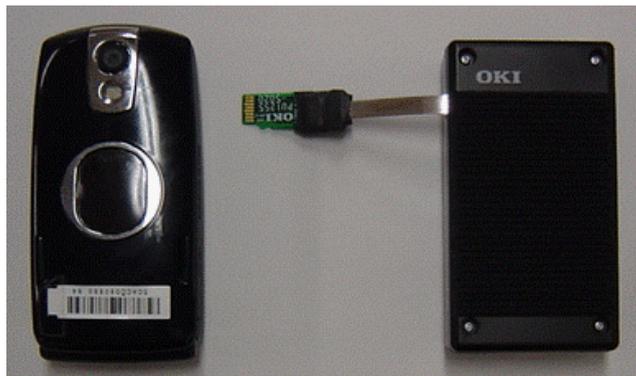


図6 μ SD インタフェース ZigBee ノード (右) と携帯電話 (左)

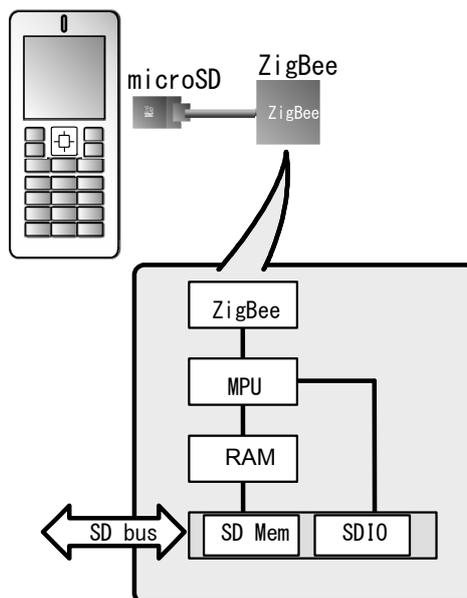


図7 μ SD インタフェース ZigBee の構成

本ノードは携帯電話と μ SD インタフェースを介して、携帯電話機上のアプリケーションから ZigBee 通信を行うものである。

使用した携帯電話では SDIO インタフェースは利用できないため、SD メモリインタフェースにて実装した。SD メモリ空間を共有メモリとして ZigBee と携帯電話の通信を実施した。直接通信ができず、お互いに共有メモリを定期的にポーリングすることでデータをやり取りする。

また、インタフェースの構成は μ SD で実装した。当初の計画では miniSD で実装する予定であったが、携帯電話の進歩に合わせて μ SD とした。

② タイプ C

ルーティング機能を持つ固定タイプの ZigBee ノードを開発した。当初は、タイプ B の機能として計画していたセンシング機能も追加し、センシングデータのサンプリングと一時的蓄積を行う機能を加えた。ファームを書き換えることで、ネットワークを管理する ZigBee コーディネータ、ルーティング機能を持つ ZigBee ルータ、省電力機能を持つ ZigBee エンドデバイスを実現することができる。

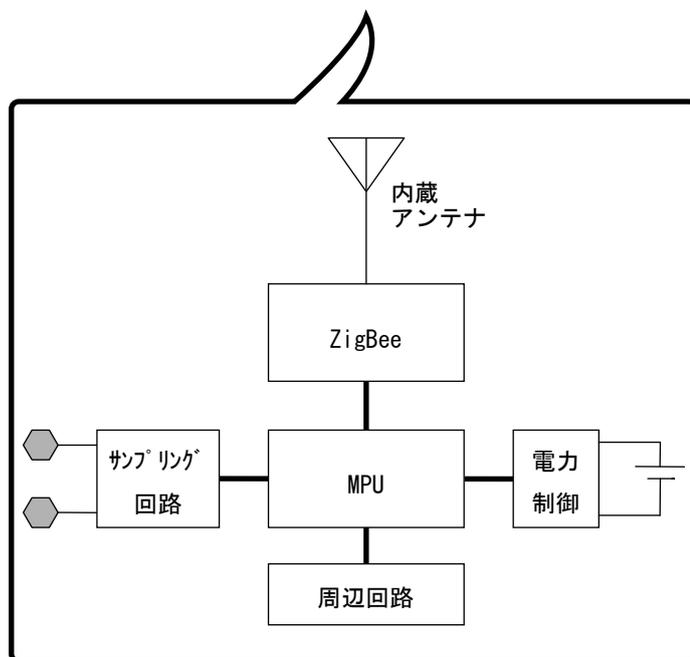


図 8 タイプ C の構成

タイプ C の主な特徴は以下の通り。

- ① 電池動作とし、省電力機能として機能（CPU、センサ、通信）毎に電力分離して制御することでスリープ時の電流削減などを実施。（1%動作で 5000 時間程

度動作（設計値）

- ② サンプリングメモリによりセンシングデータのフィルタリングなどを実施可能
- ③ センサ（加速度、温度）内蔵
- ④ デジタル RSSI による位置推定等の実験可能

機能追加により、寸法は目標をわずかに超過したが、本委託業務外で開発したプリント基板埋め込み実装技術を利用して、今後、小型化を図る予定である。

③タイプ D

ZigBee ネットワークを管理するコーディネータ機能を持つタイプ D を開発した。屋外等に設置することを想定し、以下の特徴を有する。

- ① PPP セッション、TCP/IP プロトコルの終端機能を有する。
- ② 携帯電話モデム等と AT コマンド接続可能。
- ③ 十分なユーザ領域により独自プロトコル実装可能（例：NAT）

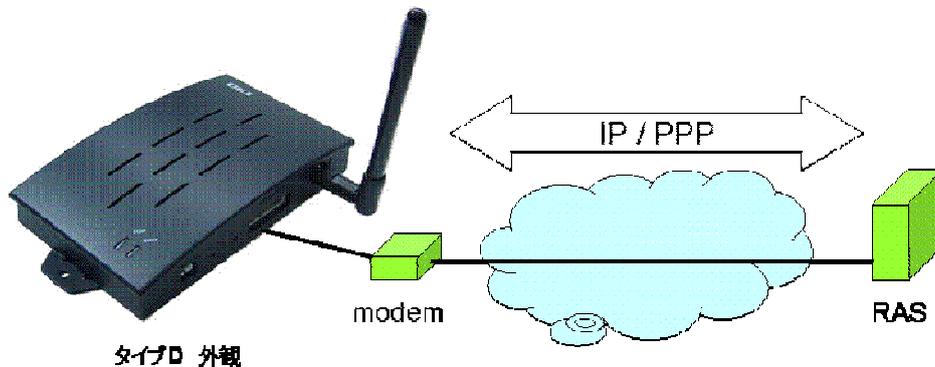


図9 タイプDの構成

4-1-3 達成状況

無線ノード開発の達成状況は以下の通り。

表1 無線ノード開発の達成状況

タイプ	ノード種別	最終目標	達成状況
A	SD	5cc	市販 PDA（HP 社製）で動作確認 8cc
	USB	20cc	Windows PC で動作確認 30cc
	μ SD	20cc	市販の携帯電話で動作確認 123cc
C	ルータ	50cc DC 動作 太陽電池動作	116cc DC / 電池動作
D	シリアル i/f	AC 動作 IP 接続	215cc、AC 動作、FOMA / Dopa 接続 PPP および TCP/IP 終端機能

サイズは、利用予定であった埋め込み実装の開発（本委託業務外）が遅れたため、ほとんどのタイプで未達であったが、機能面は全て目標どおり達成した。

4-2 技術方式開発

4-2-1 開発内容

ZigBee に対して、以下のような実用化技術を開発する。

- ① 移動ノードに対応する機能
- ② 無線ノードの故障時に、ルートを再設定する技術
- ③ スリープ制御と省電力化の向上
- ④ 無線 LAN との連携
- ⑤ 実用化に向けた、新しいプロファイルの規定

4-2-2 実施状況

① 移動ノード対応

ZigBeeV1.0 上で、ノードの移動機能を実現する方式として、移動ノードがネットワークからの切断、再接続を繰り返し、再接続の都度、移動ノードの接続先を近隣のルータに切り替えながら移動する方式を開発した。

ところが、ZigBeeV1.0 では、ルータ毎に接続するノードへ割り当てるネットワークアドレスが予め決められているため、移動ノードはネットワークへの接続先であるルータが替わる度に、ネットワークアドレスも替わる。このため、次の問題が発生する。

- ・ ネットワークアドレスで移動ノードを特定することができない。
- ・ 移動ノードがネットワークからの切断をする前にルータとのリンクが切れた場合、ルータ側でネットワークアドレスの開放が出来ず、アドレスの再利用ができない。

これらの問題を解決するために、移動ノード毎に個別の ID を割り当て、ZigBee ネットワーク内に唯一存在する ZigBee コーディネータにおいて、接続している移動ノードを管理し、移動ノードの ID からネットワークアドレスを調べる機能、移動前の接続先ルータに対してネットワークアドレスの開放を指示する機能を開発した。

図 10 に、ノードが移動するときのシーケンス図を示す。

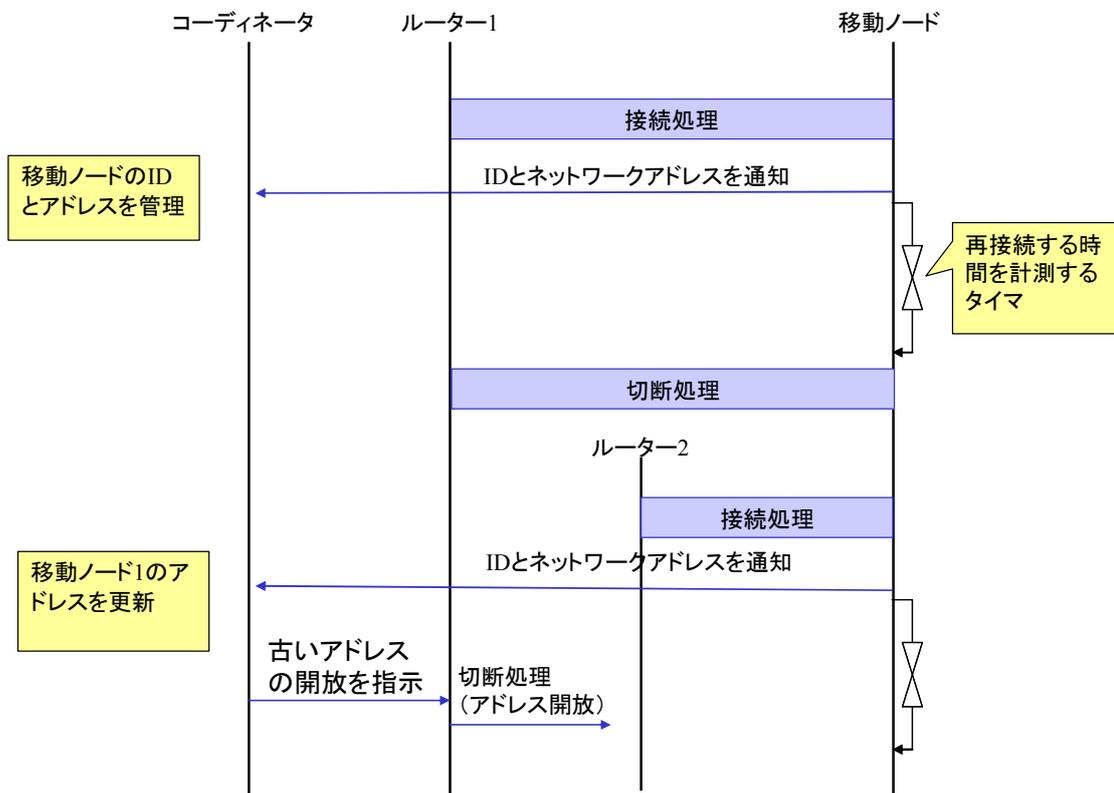


図 10 ノードの移動処理シーケンス図

移動ノードは、ネットワークに接続もしくは再接続により、接続先ルータが替った場合、ZigBee コーディネータに ID とネットワークアドレスを通知する。ZigBee コーディネータは、移動ノードが新規のネットワーク参加であれば、管理テーブルに移動ノードの情報を追加する。既に登録済みの移動ノードに対する通知であった場合は、管理テーブルの情報を更新し、古いアドレスを管理するルータにアドレスの開放を指示する。通知を受けたルータは、既に近隣には存在しない移動ノードに対して切断処理を実施することにより、アドレスを開放する。

この他、複数の PAN の ZigBee コーディネータをバックネットワークを介して接続し、移動ノードの管理機能をバックネットワーク上のサーバに持たせることにより、開発したノードの移動機能を PAN 間移動に拡張できることを確認した。また、移動ノードの接続先ルータとして、リンク品質が最も高いルータを選択することにより、適切なルータを選択できることを確認した。

さらに本年度は、開発した方式が動作することを実機により確認するために、5 台のルータを約 20m 間隔で線状に設置した ZigBee ネットワーク上で動作させた。ルータ間をゆっくり移動させた場合、接続先ルータが適切に切り替わることが確認できた。

しかし、この方式には、移動ノード数に比例してルーターノード切り替えトラフィックが増加するため、収容可能な移動ノード数に対するスケーラビリティが低いという課題があることが分かった。切り替えトラフィックが多くなる原因としては、以下が考えられる。

- 各移動ノードが定期的に行う近隣ルーターノードの探索トラフィックが非常に多い
- ノードの移動距離にかかわらず、定期的にルーターノード切り替えを実施しているため、不必要なルーターノード切り替えが行われている。

これらの課題を解決するために、システム構成とルーターノード切り替え手順を再検討し、新たな方式を開発した。

図 11 に開発した方式のシステム構成を示す。

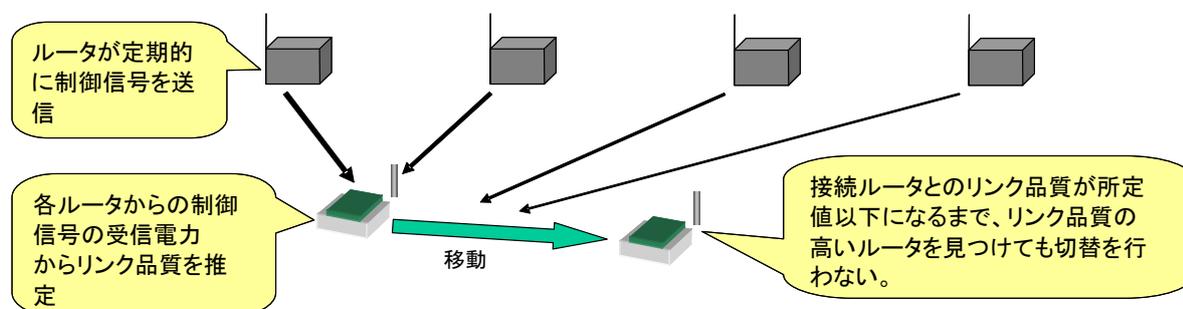


図 11 移動ノード対応方式のシステム構成

開発方式の動作概要は以下の通りである。

- ルータノードが定期的に制御信号をブロードキャストする。
- 移動ノードは、ルータノードからの制御信号により近隣ルータノードおよびそのルータノードとのリンクの品質を認識する。
- 接続しているルータノードとのリンク品質が低下した場合のみ接続先を切り替える。
- 接続先の切り替え時にルータノード探索を行わず、ルータノードからの制御信号により認識している近隣ルータノードから適切なルータノードを選択して切り替えを実行する。

開発方式で、リンク品質がどの程度の値になったときにルータノード切り替えを行うべ

きかを検討するために、ルータノードと移動ノードの距離に対する受信電力値を測定した。測定場所は、ビル内の廊下で、幅 2.2 メートル天井高 2.6 メートル、長さ 52.5 メートル、ルータノードを天井に設置し、移動ノードは、廊下の中央、高さ 20 センチメートルに設置した。図 12 に測定結果を示す。この結果から、受信電力値にはフェージングによる変動があることが分かる。また、距離減衰の特性を調べたところ、距離の-2.45 乗に比例して減衰することが分かった。

実験で用いたノードで採用している 2.4GHz 帯の ZigBee では、受信感度は-85dBm 以下と規定されている。フェージングによる変動を許容するために、ルータノード切り替えの許容受信電力値を受信感度より 10dB 大きい値とすると、ルータノードと移動ノード間の距離は 10 メートル程度となることが分かった。この結果より、ルータノードの間隔が 10 メートルより十分短い場合は、最も近いルータノードに切り替えなくても、接続しているルータノードとの距離が 10 メートル程度になるまでは、品質の良い通信が可能であると考えられることができる。このように動作させることにより、ルーターノードの切り替え処理に必要なオーバーヘッドを削減することができる。

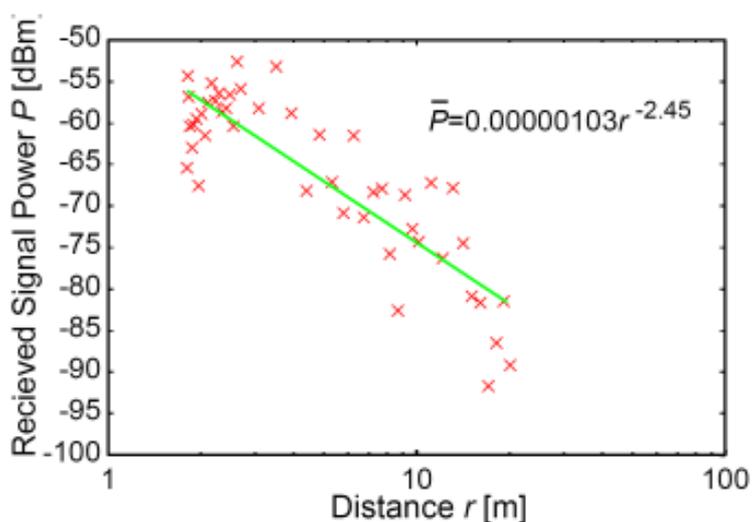


図 12 ルータノードと移動ノード間の距離とリンク品質の関係

次に、開発方式によるトラフィック削減効果を評価した。表 2 に評価の前提条件、図 13、図 14 に移動ノード数に対する単位時間当たりの制御信号送信回数、通信可能ルータ数に対する単位時間当たりの制御信号送信回数を示す。図には、初めに開発した切断、再接続を繰り返す方式を従来方式、ルータが定期的に制御信号を送信する方式を提案方式と表記している。これらのグラフから提案方式は提案方式と比べ、移動ノード数や通信可能なルータ数の増加に対する制御信号送信回数の増加を小さくすることが可能であることがわかる。

表 2 前提条件

通信可能なルータ数	4~20
移動速度	1m/s (3.6km/h)
制御信号送信間隔	3 秒, 5 秒, 10 秒

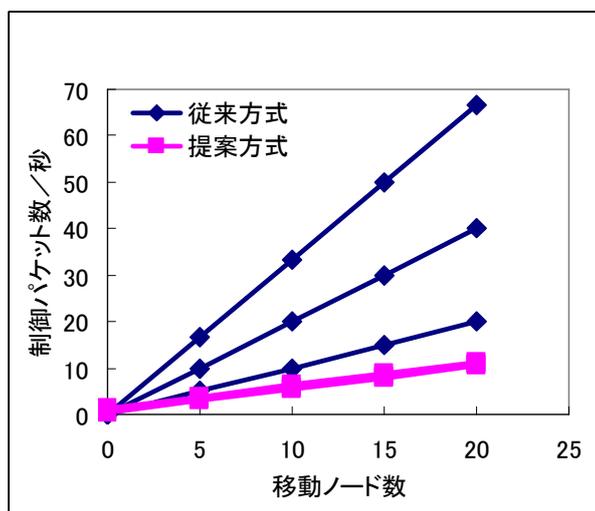


図 13 移動ノード数に対する単位時間あたりの制御信号送信回数

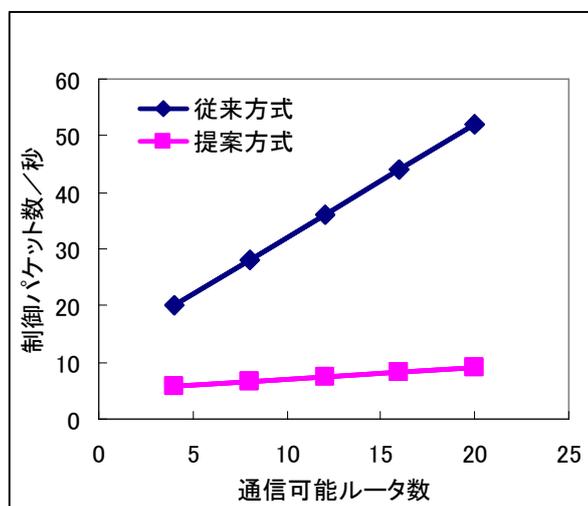


図 14 通信可能ルータ数に対する時間当たりの制御信号送信回数

さらに、効率よくルータノードの切り替えを行う方法として、移動ノードの動きを考慮して切り替え先のルータを選択する方法を検討した。ルータノードの切り替え時に、移動ノードから最も近いルータノードを切り替え先とするのではなく、移動方向にあるルータノードでリンク品質が許容値以上のルータノードを切り替え先ルータノードとして選択する方法である。この方式により、ルータノードの切り替え処理を行う回数をさらに削減することができると考えている。

また、開発方式をノードに実装し、実証実験で開発方式が動作することを確認した。

② 故障対応方式

スリープ制御では、ルータノードを冗長に配置し、交代でスリープすることでルータノードの省電力化を図るアプローチを取っている。このアプローチでは、今まで動作していたルータノードが故障により動作を停止する現象と、動作していたルータノードがスリープ状態に移行する現象を同じ現象としてとらえることが出来るため、故障対応を個別に検討することはせず、スリープ制御と合わせて検討を進めた。スリープ制御で検討している方式を採用することにより、故障が発生した場合でも、スリープ制御が動作しネットワークを再構築可能である。また、中間目標もこの方式で十分達成可能であることを確認した。

しかし、スリープ制御による省電力化と故障対応にかかる遅延時間は、トレードオフの

関係にあるため、現在のアプローチには限界があることが分かった。そこで、スリープ制御とは独立した故障対応方式を検討した。

スリープ制御とは独立した故障対応方式として、ZigBee1.0 の機能を用いて実現できる方式を含め、5 つの方式を検討してシミュレーションを実施した。

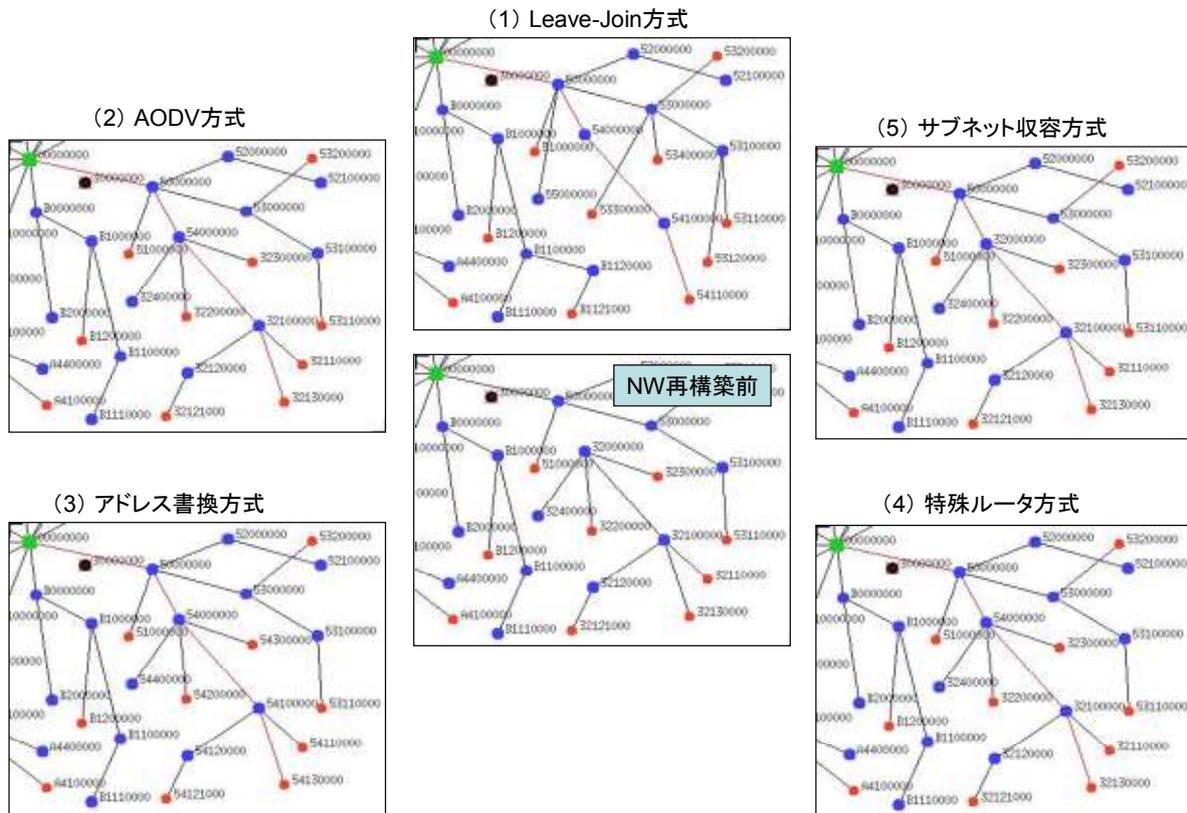


図 15 故障対応方式

図 15 は、あるルーターノードが故障により停止したときに、それぞれの方式で再構築して得られるネットワークを示している。中心の図が再構築前のネットワークで、黒丸のルーターノードが故障ノードである。それぞれの方式の動作概要を以下に示す。

1) Leave-Join 方式

故障を検出したノードは、配下のノードを一旦 Leave させた後、健全ノードへの Join を行う。一方、配下ノードは Leave の後、通常の初期シーケンスにより所定ノードへの Join を行い、健全状態へと移行する。

2) AODV 方式

故障を検出したノードは、送り先ノードへのルート要求ブロードキャストパケットと、それに応答した送り先ノードのルート応答パケットによりルート探索を行う。その結果ルート上ノードにはルーティング情報が保持され、ルーティングが行われることにより、送り先ノードへの通信が成立する。

3) アドレス書換方式

故障を検出したノードは、配下のノードの接続を保持したまま、健全ノードへの Join を行う。ここで付与された新ショートアドレスから書き換え情報を抽出し、配下ノードへユニキャストもしくはブロードキャストにより通知する。配下ノードはその情報を元に、旧ツリートポロジが保持されるようにショートアドレスの書き換えを行い、健全状態へと移行する。

4) 特殊ルータ方式

故障を検出したノードは、配下のノードの接続を保持したまま、健全ノードへの Join を行う。上位との通信はここ付与された新ショートアドレスを用い、下位との通信は旧ショートアドレスを用い、その仲立ちを行う特殊ルータを機能させる。さらに、旧ショートアドレス配下ノードへのルーティングを行うため、上位ノードへのルーティング情報通知パケット送出を行い、健全状態へと移行する。

5) サブネット収容方式

故障を検出したノードは、配下のノードの接続を保持したまま、サブネット収容機能を持った健全ノードへのショートアドレス指定 Join を行い、旧ショートアドレスおよび旧ツリートポロジを保ったまま網が構成される。サブネットを収容したノードは、当該サブネット配下のノードとは指定されたショートアドレスを用いて通信を行う。さらに、当該サブネット配下ノードへのルーティングを行うため、上位ノードへのルーティング情報通知パケットの送出を行い、健全状態へと移行する。

以上検討した方式に対してシミュレーションを実施し、故障検出から健全状態へと修復する時間に関する解析を行った。シミュレーションは、以下に示す方法により実施し、故障ノードの段数に対する故障検出から故障修復までに要した時間「故障修復時間」と、故障修復に費やした無線占有時間の総和「無線占有時間」を評価指標とした。

ア) 主要パラメータ

シミュレーションで用いた時間に関する主要パラメータを表 3 に示す。これらのパラメータは、ZigBee プロトコルへの適合性を保ち、実システムからの乖離を抑えつつ、現実的なシミュレーション時間となるように設定したものである。

表 3 主要パラメータ

項目	パラメータ
無線シミュレーション解析刻み	10 (usec)
トランザクション実行刻み	1 (msec)
Join 開始ランダム遅延時間	0 ~ 5 (sec)
ビーコン応答ランダム遅延時間	0 ~ 63 (msec)
ビーコン応答待ち時間	64 (msec)
ブロードキャスト送信ランダム遅延時間	0 ~ 63 (msec)

イ) ネットワークポロジとノード配置

シミュレーションで用いたネットワークポロジおよびノード配置を図 16 に示す。ネットワークポロジは、1 台の ZC と 62 台の ZR からなる完全二分木の 5 段構成とした。ノード配置は、段数を飛び越えた接続が発生せず、かつ、故障ノードの代替ノードとなる健全ノードが見つかる位置となるように設定した。

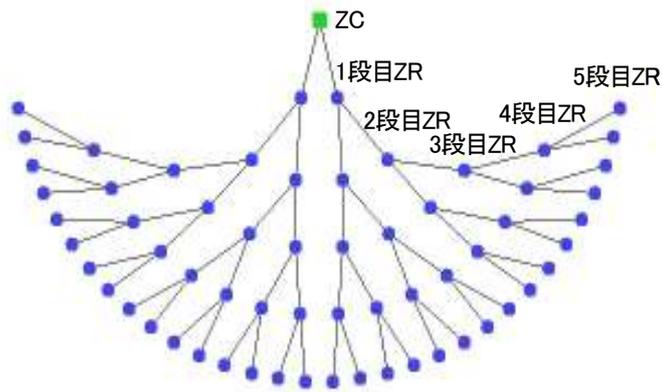


図 16 ネットワークトポロジとノード配置

ウ) シミュレーション手順

シミュレーションは、以下の手順により実施した。

- ① 1 段目から 4 段目にある ZR の所定の 1 台を故障ノードとする。
- ② リーフノードである 5 段目 ZR のそれぞれから ZC 宛の通信を実施する。
- ③ 通信過程で故障が検出されると故障修復モードへ移行する。
- ④ 所定の方式により故障修復が実施され、その間に要した時間「故障修復時間」と使用された無線占有時間の総和「無線占有時間」を計測する。
- ⑤ 全てのリーフノードの通信が完了するまで実行して上記時間を総和する。
- ⑥ 手順②～⑤を 12 回繰り返し、上記時間について最良、最悪値を除く 10 回の平均を所定故障ノードの評価値とする。
- ⑦ 故障ノードを順次変更して手順①～⑥を繰り返す。
- ⑧ 故障ノード段数毎に上記評価値の平均を算出し、所定故障ノード段数の評価値とする。

なお手順③の故障検出方法は、MAC 層でのリトライ 3 回による 4 回の送信と NWK 層でのリトライ 2 回による 3 回の送信の回数に乗じた 12 回の送信に対し、送信相手ノードからの ACK 応答が無かった場合に当該ノードが故障しているものとした。

以上の方法により実施したシミュレーション結果を示し考察を行う。

まず故障回復時間について、図 17 に示す結果が得られた。なお、特殊ルータ方式とサブネット収容方式については有意な差が無かったため統合した。

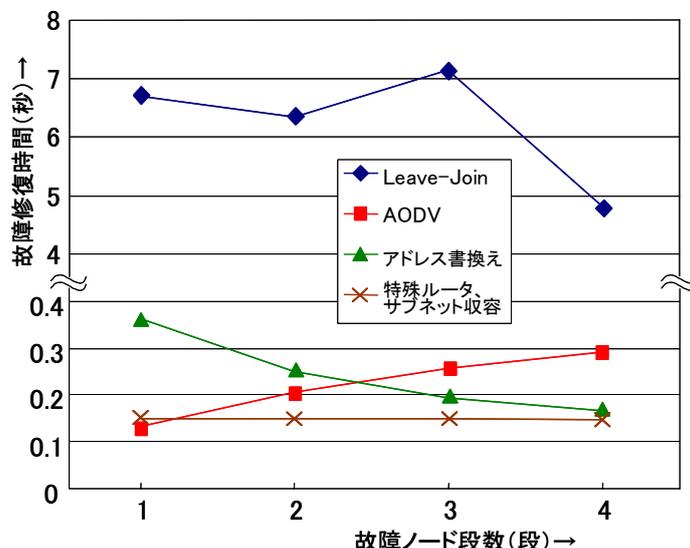


図 17 故障修復時間

1) Leave-Join 方式

Joinを開始する際に輻輳を防止する目的で挿入されるJoin開始ランダム遅延時間に大きな影響を受けるため、他の方式と比べて大きな故障修復時間を必要としている。故障ノード段数の増加につれて、再接続が必要な配下ノードが減少するため、故障修復時間は小さくなる。別の要因として、接続可能な近傍ノードの密度にも依存しており、故障ノード段数3で扇形状の端に位置するノードにその影響が現れており、故障修復時間が大きくなっている。

2) AODV 方式

故障ノードの先にあるZCへの通信ルートを探し出す時間に依存するため、故障ノード段数の増加につれて、故障修復時間は大きくなる。本方式は再接続処理が不要な方式であるが、ブロードキャスト送信ランダム遅延時間が必要となるため、それなりに故障修復時間を要している。

3) アドレス書換方式

アドレス書き換えのプロトコルを配下ノードに伝達させる時間と再接続処理時間の和が故障修復時間となる。このため、故障ノード段数の増加につれて上記プロトコルは減少し、故障ノード段数4で故障修復時間は再接続処理時間に収束する。ここで再接続時間は、完全二分木であるため2回発生する再接続処理時のビーコン応答待ち時間が大きな割合を占めている。

4) 特殊ルータ方式、サブネット収容方式

故障ノード段数に依存せず、故障修復時間は、ほぼ上記再接続処理時間となる。

次に無線占有時間について、図18に示す結果が得られた。ここでも、特殊ルータ方式とサブネット収容方式については有意な差が無かったため統合した。

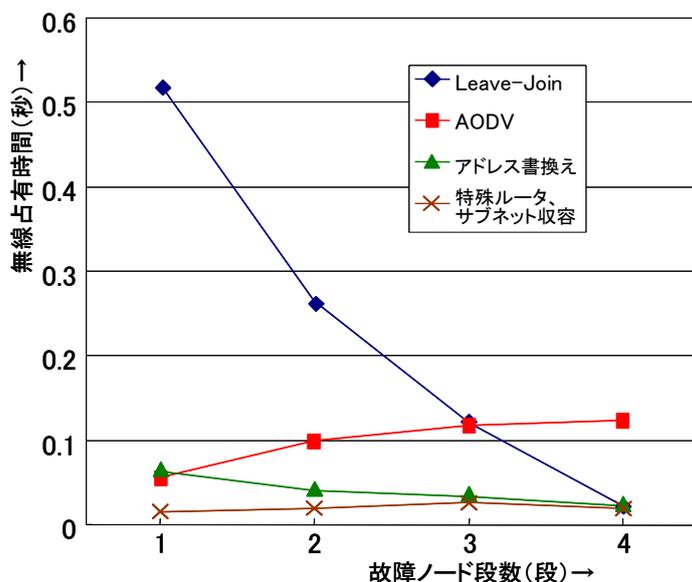


図18 無線占有時間

1) Leave-Join 方式

故障ノード段数の増加につれて、再接続が必要な配下ノードが減少するため、そのノード数に比例して無線占有時間が小さくなる。そして、故障ノード段数が4の場合に2回の再接続に必要な無線占有時間に収束する。

2) AODV 方式

故障ノードの先にある ZC へのルーティングを探し出すために通信が行われるため、故障ノード段数の増加につれて無線占有時間は大きくなる。

3) アドレス書換方式

故障ノード段数の増加につれて、アドレス書き換えプロトコル通信量は減少するため、無線占有時間は小さくなる。そして、故障ノード段数が 4 の場合に上記通信が行われないため、2 回の再接続に必要な無線占有時間に収束する。

4) 特殊ルータ方式、サブネット収容方式

ほぼ 2 回の再接続に必要な無線占有時間となる。故障ノード段数により、無線占有時間が多少変動しているのは、ビーコン応答の通信量、つまり近傍ノード密度を反映しているものである。そして、AODV 方式以外の再接続処理が行われる方式では、この影響を受けている。

シミュレーションの結果、いずれの故障対応方式においても、故障修復時間の目標値を十分達成しており、相当なネットワーク規模でも対応できることが判明した。そのシミュレーション結果を加えた故障対応方式比較表を表 4 に示す。

表 4 故障対応方式比較

	Leave-Join 方式	AODV 方式	アドレス書換方式	特殊ルータ方式	サブネット収容方式
故障修復時間	×	△	△	◎	◎
無線占有時間	×	△	○	◎	◎
標準親和性	◎	◎	△	×	×
ノードリソース	◎	△	◎	△	△
修復品質	アドレス変化	×	◎	○	○
	トポロジ変化	×	×	○	○
	ルーティング方式変化	◎	△	◎	×

以上検討した方式の中で、故障修復時間に着目すれば、特殊ルータ方式やサブネット収容方式が際立っている。一方全体のバランスを考えた場合には、大きな欠点の無いアドレス書換方式が良好な方式であると考えられる。

③ スリープ制御

ルータを冗長に配置し、交代でスリープすることによりルータを省電力化するアプローチで検討を進めた。17 年度には、まず、既存方式の調査を行い、本機能実現のために利用可能な方式として SPAN を選択した。

SPAN は、アドホックネットワークを対象として提案された方式で、次のように動作する。定期的に「自分がコーディネータ(ルーティング機能を動作させるノード)であるかどうかの状態と 2 ホップ先までのコーディネータの情報を含んだビーコン信号を送信する。各ノードは自律的にコーディネータになるか、コーディネータをやめるかを決定する。コーディネータ以外のノードは、定期的に、隣接コーディネータが直接あるいは 1 つないし 2 つのコーディネータを介して自ノードの他の隣接コーディネータに接続しているかどうかをチェックし、接続していない組み合わせがあれば、コーディネータとなる。コーディネータは、隣接ノードが直接あるいは 1 つないし 2 つのコーディネータを介して自ノード

の他の隣接ノードに接続しているかどうかをチェックし、接続している組み合わせがあれば、ランダム時間後にコーディネータをやめる。結果としてフィールド全体にコーディネータで構成するメッシュ状の幹線網が形成される。図 19 に SPAN を使って構成したネットワークの例を示す。丸で示されているのがノードで、濃い線で結ばれているノードがコーディネータである。

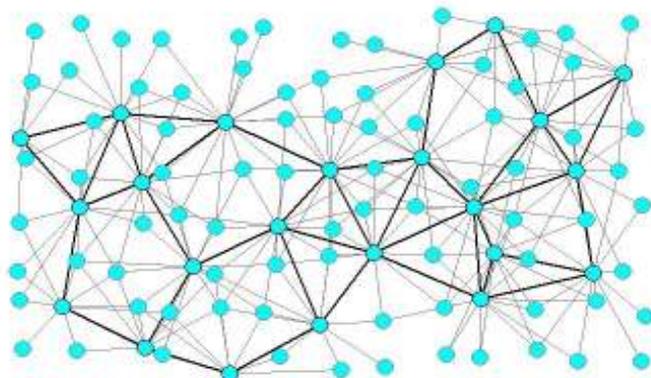


図 19 SPAN を使って構成したネットワーク

本年度の検討では、SPAN を使い以下のようにしてネットワークの構成、スリープ制御を実現することとした。

まず、SPAN によりルータとして設置したノードのネットワークを構成する。SPAN によりコーディネータになったノードのみルーティング機能を動作させる。コーディネータにならなかったルータはルーティング機能を止め、ビーコン送信時のみ送受信機を起動し、その他の期間は送受信機を停止するスリープ制御を行う。

移動ノードは、ビーコン情報からルーティング機能を動作させているルータで最も近くにあるルータを選択し、ネットワークへ接続する。ただし、ルーティング機能を動作させるルータは時間とともに変化するため、移動ノードは定期的に接続先ルータを検索し再接続するか、ネットワークを介した通信が必要なときに、ネットワークへの接続を行うなどの対応が必要である。

次に、時間経過とともに、ルータがどのように電力を消費するかを調べた。図 20 にルータの残余電力が少なくなり、ネットワーク全体の接続性が維持できなくなる直前の様子を示す。

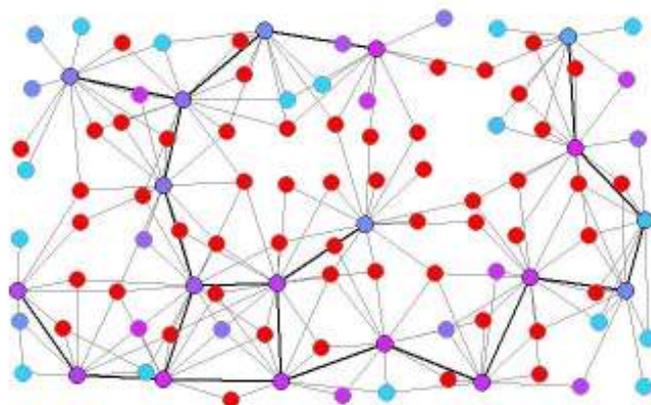


図 20 ネットワークの接続性が維持できなくなる直前の様子

ノードの色は、ルータの残余電力を示している。水色は残余電力がフルにある状態を、色が赤くなるほど残余電力が少ない状態を示している。また、赤色の状態は、残余電力不

足で、ルーティング機能を動作させることができない状態である。図 20 より、ネットワークの中心部のノードほど電力消費が早く、ネットワークのエッジに位置するノードほど電力消費が遅い傾向があることが分かる。省電力化の効率を向上させるためには、このようなばらつきが出来る限り少なくなるように改良する必要がある。

次に、ネットワークの接続性が維持できなくなった直後の状態を図 21 に示す。

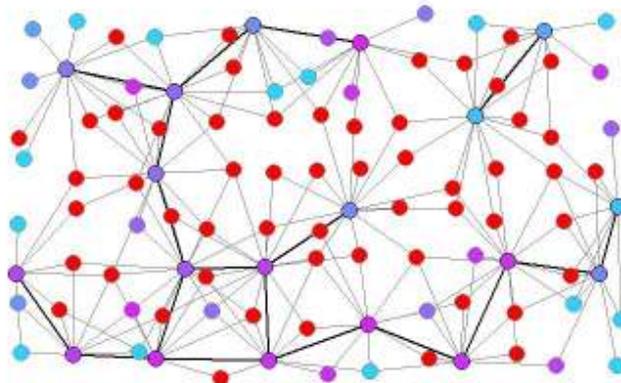


図 21 ネットワークの接続性が維持できなくなった直後の様子

ネットワークの右上部にネットワークから孤立した部分が発生している。ところが、よく観察すると、孤立した部分のコーディネータとネットワークの間にコーディネータとなることができるノードが存在している。上図の例の場合、このノードがコーディネータとなれば、孤立を解消することができる。SPAN では、2 つ以上のコーディネータで構成されるサブネットワーク部分が孤立した場合、孤立したネットワークと残りのネットワークの間に存在するノードがコーディネータにならなくて良いと判断できる条件を満足してしまい、このような現象が発生する場合がある。この現象は、ネットワークの接続性を維持できなくなる直前のみでなく、条件さえ満足してしまえば、残余電力が十分ある場合でも発生する可能性があると考えられる。今後、ネットワークの接続性を保証する仕組みを追加することを検討する必要がある。

18 年度は、17 年度に開発した方式の課題の解決及び方式の改良として以下を実施した。

- ネットワークが部分的に孤立する現象を解決
- ルータになるかどうかを判定するための計算量を削減
- アクティブなルータの冗長度を設定可能

しかし、この方式を ZigBee ネットワーク上で動作させるためには、ZigBee プロトコルを大きく改良する必要があることが明らかになったため、これまでの検討を踏まえた上で、ZigBee ネットワークへの適応を考慮した方式の検討を進めることとした。

ZigBee ネットワークにおいてはクラスタツリー方式によるネットワークが実現されている。これはネットワークをツリー状に形成し、ツリー構造に依存したアドレスを用いる。構成する全てのノードが木構造を示すパラメータを共有することで、ルーティングテーブルを用いることなく、任意の端末への転送を可能とするものである。以下、木構造の末端（葉）に位置するノードをエンドノード、他のノードをルータノードと記載する。

本検討はエンドノードのみがスリープ制御を行うことができる ZigBee ネットワークの特徴を利用し、クラスタツリーの特徴を残しつつ、ルータノードのスリープ制御を可能とするものである。

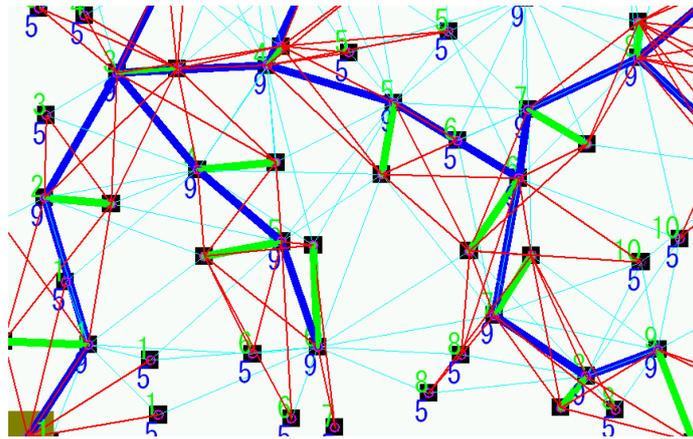


図 22 ルータのスリープ制御を実現するクラスタツリー

今回の検討では、以下のようにしてネットワークの構成とスリープ制御を実現する。

まず、通常の ZigBee の方式に従ってネットワークを構成する。その後、各ノードはブロードキャストの信号を送受信し、直接通信が可能な周辺ノードのリストを作成する。次にルータノードは周辺のエンドノードと情報を交換し、自身がツリー上で接続している、すなわちパケットの転送を行う必要のあるノード全てと接続可能なエンドノードを選出し、ルータノードとエンドノードとの間でペアを構成する。ペアとなるエンドノード（以下代替ノード）はルータノードがスリープ中にルータ機能を代替する。周辺のルータノードがすでにペアを構成している場合には、代替ノードはルータノードだけではなく、当該ルータノードの代替ノードとも直接通信可能である必要がある。

しかしながら、ZigBee の通常のツリー作成方法では上述の条件を満たすエンドノードの選出は困難である。そこで、ツリーを作成する前にノード間で必要な情報を交換し、全てのルータノードについて、ペアの構成を可能とするツリー形成方式を開発した。結果、ノードの設置密度が一定以上あれば、全てのルータノードにペアを構成できることを確認した。さらに本方式を用いることによって、ネットワーク中のルータノード数を削減することが可能となり、ネットワーク全体の消費電力の削減が実現される。

代替ノードがルータノード機能を代行する場合には、ルータノードと代替ノードが通信を行い、2 ノードが通信に用いるアドレスを入れ替える。アドレスはツリー上の相対的な位置関係を示しているために、アドレスの入れ替えによって、エンドノードとルータノードの役割が入れ替わる。ルータ機能を代行されたルータはエンドノードとして動作することが可能となるため、スリープ制御を行う。

図 22 がルータノードのスリープ制御を実現するクラスタツリーの例である。四角で示されているのがノードで、青線がルータノード間の接続、緑線がルータノードと代替ノードを接続している。赤線は代替中のルータノードが通信に利用する経路を示している。水色線は結ばれたノードが直接通信可能であることを示している。右下端はコーディネータ、青線・緑線が到達していないノードはエンドノードである。

エンドノードは ZigBee で規定されている **indirect transmission** を用いることで大幅な省電力化が可能である。一方、ルータノードは他の端末から送られるパケットを中継する必要があり、受信待機状態を継続するためにスリープ制御を行っていない。従ってルータノードの消費電力はエンドノードと比較すると極めて大きい。

ルータノードは代替ノードがルータ機能を実行している間は消費電力を大幅に抑えることが可能である。図に示した例では全てのルータノードに代替ノードが存在しているため、ルータ機能を実行する時間と実行しない時間を同じになるように制御した場合には、全てのルータノードの消費電力を約 50%にすることが可能である。1つのルータノードに

複数の代替ノードを作成することでルータの消費電力をさらに削減することも可能である。

さらに、定期的にネットワークを再構成し、ルータノード・代替ノードのいずれにもなっていないエンドノードをルータノードに、ルータノード・代替ノードをエンドノードとすることで、ルータノードの消費電力を削減することもできる。

本方式はスリープ制御による省電力化以外に、ルーターノードの故障時における代行ノードの確保、障害物等によるルーターノード間の転送経路の切断への対応が可能となり、ロバストなネットワークの構築にも資するものと考えられる。

18年度に検討した方式はネットワークの接続性の確保及び ZigBee ネットワークへの対応を考慮したものであったが、最終目標を達成には至らなかったため、19年度はさらに改良を加えた方式の検討を行った。

18年度は ZigBee に変更を加えないことを前提としたために ZR を交代するだけで ZR として動作している時間帯の省電力化は行わなかったが、19年度は ZR も定期的にスリープすることとした。一般的に中継処理を行うノードにスリープ制御を適応すると通信遅延が大幅に増加する問題がある。従って遅延と省電力化を両立させることが課題となる。

ZigBee ネットワークにおいてはクラスタツリー方式によるネットワークが実現されている。これはネットワークをツリー状に形成し、ツリー構造に依存したアドレスを用いる。構成する全てのノードが木構造を示すパラメータを共有することで、ルーティングテーブルを用いることなく、任意の端末への転送を可能とするものである。

今回の検討では以下のようにしてネットワークの構成とスリープ制御を実現する。各 ZR は周辺の既にネットワークに参加している ZR から親となる ZR を選択し ZigBee ネットワークに参加する。従来の ZigBee では親となるノードを選択する際に制約条件はほとんど存在しない。親ノードとの間の通信路の状況、親ノードと ZC とのホップ数などを考慮して各ノードが自由に親ノードを選択することができる。本方式では「親の親（祖父）となるノードと直接通信可能であるノードを親とする」という制約条件を加える。ZigBee のアドレス付与方式では、親のアドレスから祖父のアドレスを計算することが可能であり、親のアドレスと Neighbor List から条件を満たすノードを求めることが可能である。

図 23 に本手法を用いてクラスタツリーを構成した例を示す。図中の数字は ZC からのホップ数を示す。通信時には祖父と孫とのリンクを用いた図中赤色、青色 2 つのツリーを主に用いる。ZC から各ノードへの通信は赤色、各ノードから ZC への通信は青色のツリーを用いる。各ツリーのノード間でスリープ制御のタイミングを調整することで遅延を削減することができる。従来技術は、上下両方向の通信遅延を削減しつつスリープ制御を行うことは困難であったが、本方式では通信路を一方通行にすることでこの問題を回避している。

消費電力と遅延の関係を図 24 に示す。青、緑が既存方式、赤が今回提案している手法の性能を示す。グラフの左下が低遅延かつ低消費電力を意味しており、最も良い性能を示す。消費電力は方式を一切適用しない場合を 1 とした比率である。消費電力 0.1 の点が方式を適用しない場合と比較して 10%となる点であるが、遅延をほとんど増加させることなく消費電力 10%を実現できている。また、既存方式では遅延が大きく増加している消費電力 0.05（適用しない場合の 5%）においても本手法は遅延がほとんど増加しておらず、さらなる低消費電力化が可能となっている。

本方式は 2 つのツリーを構成するために、全てのノードにおいて複数の通信経路を確保することができる。従って本手法はスリープ制御による省電力化以外に、ルータノードの故障時における代行ノードの確保、障害物等によるルータノード間の転送経路の切断への対応が可能となり、ロバストなネットワークの構築にも資するものと考えられる。

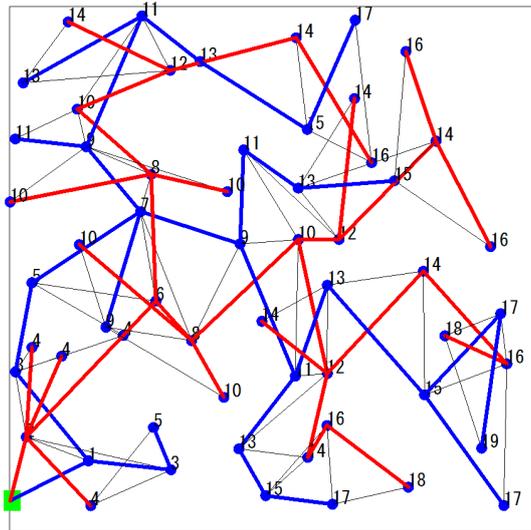


図 23 ZR のスリープ制御と低遅延化を同時に実現するクラスタツリー

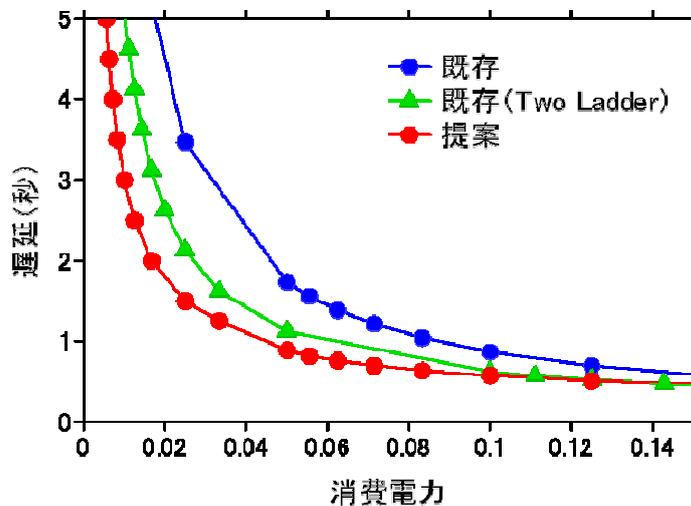


図 24 スリープ制御の性能評価

④無線 LAN との連携

異なる場所に設置された ZigBee ノード同士を接続する場合には、ZigBee プロトコルを一旦終端し、異なるプロトコル(例えば TCP/IP や UDP/IP など)で接続する方法が考えられる。このような接続方法はプロトコルの変換を行っているため、ゲートウェイを介した接続と位置づけられる。しかしこのようなプロトコル変換を多用した場合、ZigBee ノードで構成されるセンサネットワークのドメインが増加することになり、その管理が複雑化してしまう恐れがある。そのため ZigBee プロトコルを終端することなく、シームレスにセンサネットワーク同士を接続するブリッジ接続の実現が要望されており、ZigBee アライアンスでも ZBD(ZigBee Bridge Devices)としてその機能の検討が進められている。

またセンサネットワーク間を有線ネットワークで接続した場合、有線を設置するための敷設コストが必要となるため、無線通信によるセンサネットワークの利便性が失われてしまう恐れがある。そこで本節では無線 LAN との連携と題して、センサネットワーク間の接続に無線 LAN を活用し、ZigBee トラフィックの効率的に転送する方式の検討を行った。本方式の特徴として、

- 1) ZigBee の電波到達距離の増幅機能 (リピータ機能)
- 2) PAN 内のシームレスな接続機能 (ブリッジ機能)
- 3) 無線 LAN のメッシュ化による ZigBee トラフィックの効率化

などが挙げられる。

図 25 に異なる場所に設置された ZigBee ネットワークが、メッシュ化された無線 LAN で相互に接続されている様子を示す。無線 LAN ノードは ZBD 機能を備えており、無線 LAN の転送フレームの中に ZigBee フレームをカプセル化して送信することで他のセグメントへの透過的な接続を実現している。

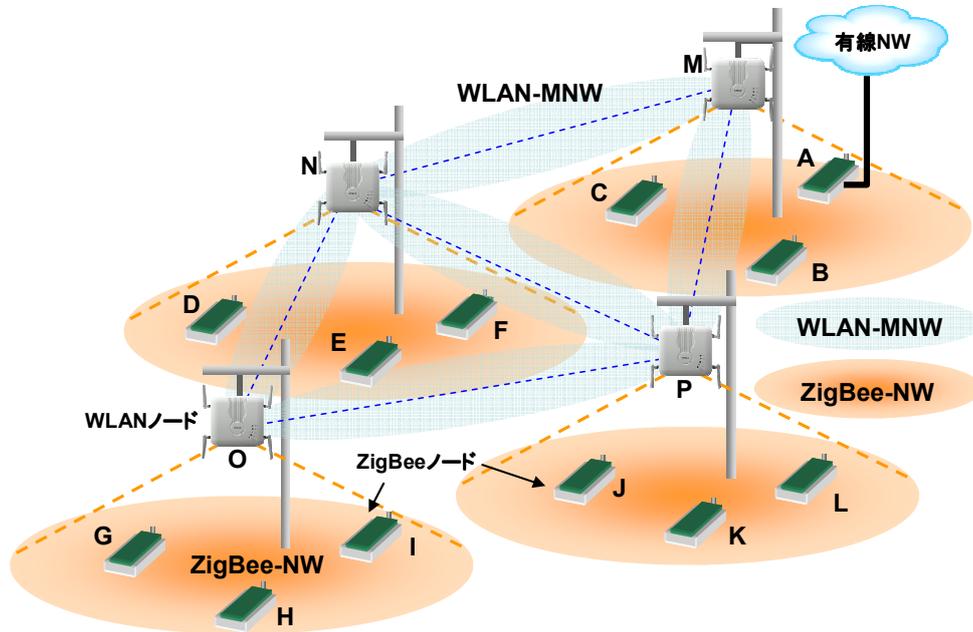
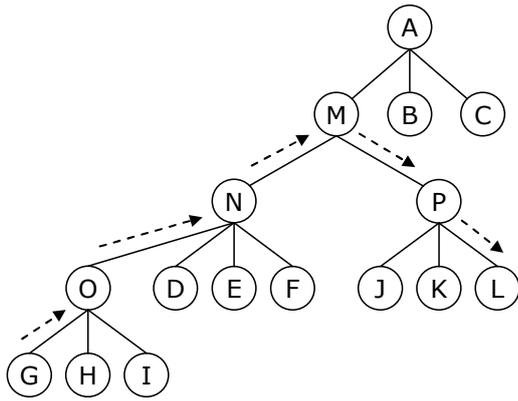


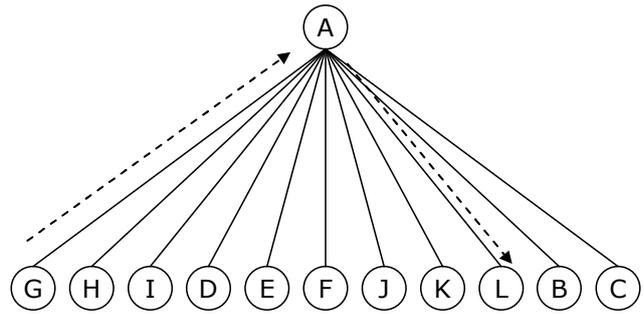
図 25 ZigBee ノードと無線 LAN ノードの接続構成例

ZigBee の NW 層で規定されているクラスタツリールーティングでは、パケットは ZR (ZigBee Router) を分岐点としたツリー構造に沿って中継される。そのため異なる ZR に帰属する ZED (ZigBee End Device) 間の通信は、ツリー上の共通の親 ZR を経由する必要がある。例えば共通の親 ZR を ZR-A とし、無線 LAN ノードで ZigBee ネットワークを終端した場合、ZED-G から ZED-L へのフレーム転送経路は $G \rightarrow O \rightarrow N \rightarrow D \rightarrow N \rightarrow M \rightarrow A \rightarrow M \rightarrow P \rightarrow L$ と複数の ZR を経由することとなる。この様子を図 26 の a) に示す。

その結果、ZR の中継処理が増大し、所望するスループットが得られない恐れがある。そこでブリッジ方式 (シンク集中方式) では、ZED が ZR に接続する際にリクエストフレームを ZR-A まで透過的に中継し、ZED-G の親 ZR を ZR-A とすることで、論理的にスター型のトポロジーを構成する。この様子を図 26 の b) に示す。これにより中継 ZR の処理を軽減することが可能となる。



a) クラスツリー型トポロジー



b) スター型トポロジー

図 26 ZigBee ネットワークトポロジ

一方、本方式は、すべてのトラフィックが ZR-A を経由することにより、ZR-A の処理負荷が増大してしまう。そのため、提案方式(メッシュ分散方式)では ZR-A を経由せず、所望の ZigBee ネットワークに直接転送できる仕組みを提供する。提案方式では WLAN-MNW 上で ZED の接続管理テーブルを交換し、WLAN フレーム転送時にこのテーブルを参照することで、中継先の ZigBee ネットワークを決定することが可能となる。この様子を図 27 に示す。また転送先の WLAN ノードにおいては、フレームの送信元 MAC アドレスを ZR-A の MAC アドレスに書き換えることで、ZED からは ZR-A を頂点とした論理的なスター型接続を維持することが可能となる。

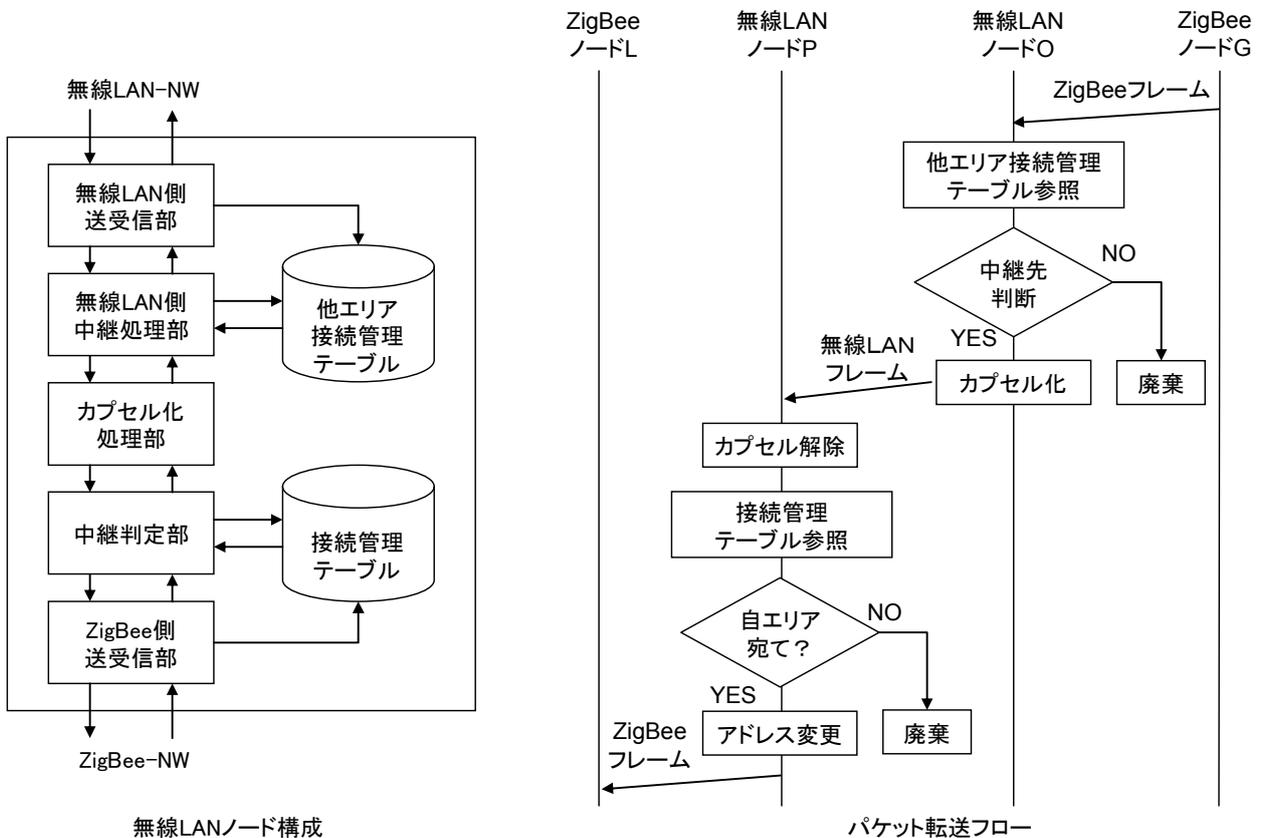


図 27 無線 LAN ノードの構成例とフレーム転送フロー

本方式の性能評価として表 5 に示す条件でシミュレーション評価を行った。図 28-1 は ZR-A におけるパケット発生率に対するスループットを示している。ブリッジ方式では 5 秒に 1 個のパケット発生率で伝送レートの最大値 250Kbps を超えているのに対して、提案方式では ZR-A へのトラフィックを分散できていることが分かる。また図 28-2 は WLAN の帯域消費量を示しており、提案方式により中継トラフィックが平滑化されていることが分かる。

これにより提案方式が ZigBee ノード数の増加に対してスケーラビリティが得られ、最終目標としていた 1000 ノード程度の ZigBee ノード数に対しても安定的なネットワークを構成することが可能であることが言える。

表 5 シミュレーション条件

項目		詳細
ZigBee	MAC/PHY	IEEE802.15.4 (2.4GHz)
	伝送レート	250 Kbps
	パケットサイズ	127 Byte
	ノード個数	1024 (32 x 32)
無線 LAN	MAC/PHY	IEEE802.11a (5.2GHz)
	伝送レート	54 Mbps
	ノード個数	32
	ルーティングプロコトル	OLSR
ネットワークシミュレータ		OPNET ver11.0
パケット発生率		1 ~ 20 pkt/min

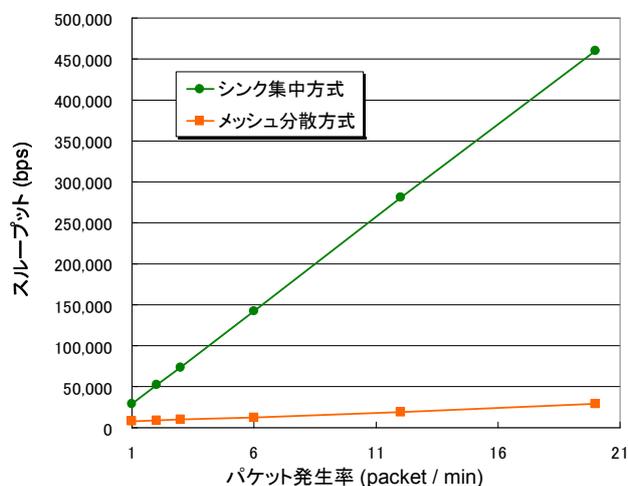


図 28-1. ZR-A のスループット

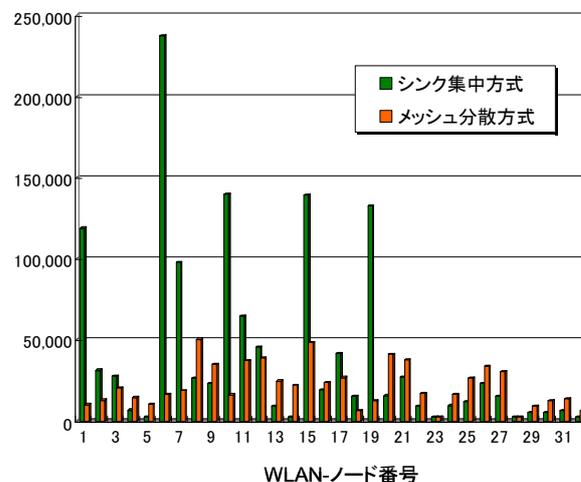


図 28-2. 無線帯域の消費量

⑤ プロファイル

平成 17 年度は、移動機能、ルータの省電力機能など、ZigBee1.0 に不足している機能を ZigBee 仕様に盛り込むため、現在 ZigBee Alliance で検討中のアプリケーションプロファイルに我々の機能要求を盛り込むことが出来るかどうかを検討し、ターゲットとする PTG を選定した。さらに、PTG の主要メンバと接触し、我々が考えている機能要求の必要性に対する意見交換など、アプリケーションプロファイルの機能要求として盛り込むための活動を行った。

平成 18 年度、19 年度は、選定した PTG において、以下のような作業を行った。

- PTG 立ち上げにあたり、方向性の議論
- 市場要求をまとめた MRD (Marketing Requirements Document)の作成協力

当 PTG では、エンドデバイスの移動性を高める必要があるため、その実現方式概要を提示しながら、以下の作業を行った。

- 技術要求 TRD (Technical Requirements Document)の作成協力
- 技術要求 TRD(Technical Requirement Document)のドラフト作成協力
- TRD のアライアンス内投票の通過、修正要求への対応、承認の獲得
- 機能実現のための個別機能クラスの提案
- アプリケーションプロファイル仕様のドラフト作成協力、個別機能クラスの仕様への反映
- アプリケーションプロファイル仕様の投票通過、修正要求への対応

アプリケーションプロファイルの制定過程は大まかに次のような過程で進められる。現在の審議過程は「iii アプリケーションプロファイル仕様の承認」から[iv パラメータ設定ガイドライン、テスト仕様の策定、相互接続試験の実施]フェーズにかかる位置にある。

- MRD(Market Requirement Document)の承認
- TRD の承認
- アプリケーションプロファイル仕様の承認
- パラメータ設定ガイドライン、テスト仕様の策定、相互接続試験の実施

ZigBee Alliance の運営方針は Alliance 外秘であるため、詳細を述べることはできないが、各アプリケーションプロファイルの市場性について、ロードマップの承認と最低複数社による相互接続性の証明などが求められるようになった。今後はこれまでのアプリケーションプロファイルの審議に加えてこれらの作業も必要となる。

4-2-3 達成状況

全てのテーマで目標達成。

4-3 実証実験

4-3-1 実施内容

京都市において屋外無線 LAN と ZigBee を連携させた実証実験を実施する。実証実験は「まちの防犯」アプリケーションへの適用を想定し、携帯ノード保持者があらかじめ設定された危険区域に近づいたり、特定区域から出入りしたりした際に、携帯ノード保持者に警告メッセージを送出するとともに、監視者に通知メッセージを送出する機能を実現する。

4-3-2 実施状況

消防局への訪問から得た現場からのニーズは、以下の3点に集約された。

1. 1000 m²程度の閉領域で ZigBee ネットワークをアドホックに設置できること。
2. 現場での隊員の入退出管理と居場所（エリア）が把握できること。
3. 現状のロープに替わるコミュニケーション手段が提供できること。

これらのニーズを満たすかどうかの判定に実証実験のシナリオを作成した。

シナリオ①

- ① 指揮本部において現場地図のポンチ絵を作成、その手書き地図に ZONE を記す。

- ② 指揮本部側において PC を立上げ、ZC 装置の電源 ON、PC と接続。
- ③ ZigBee 固定ノード 3 台で 1 つの ZONE を形成、今回の ZONE は赤、青、緑の 3 つ、ZigBee 固定ノードと ZC との接続完了を PC 画面で確認する。
- ④ ZigBee 移動ノードを消防隊員のベルトにフックと紐でつなぐ。
- ⑤ 赤から青、さらに緑と ZigBee 移動ノードが移動する。さらに緑、青、赤と戻る。其の移動を指揮本部の PC で確認する。

確認項目

1. アドホックネットワーク構築
2. 指揮本部 PC でのネットワーク構成確認
3. 隊員のネットワーク参加の確認
4. ゾーン判別

シナリオ②

- ① 指揮本部において現場地図のポンチ絵を作成、その手書き地図に ZONE を記す。
- ② 指揮本部側において PC を立上げ、ZC 装置の電源 ON、PC と接続。
- ③ ZigBee 固定ノード 3 台で 1 つの ZONE を形成、今回の ZONE は赤、青、緑の 3 つ、ZigBee 固定ノードと ZC との接続完了を PC 画面で確認する。
- ④ ZigBee 移動ノードを消防隊員のベルトにフックと紐でつなぐ。
- ⑤ 隊員がゾーン赤に移動した所で隊員は移動ノードの外付けボックスのボタンを押して指揮本部 PC に通知する。(隊員→指揮本部)
- ⑥ 隊員がゾーン青に移動した所で隊員は移動ノードを振る(揺らす)。閾値を越える大きな加速度の変化を移動ノード上で検出して指揮本部 PC に通知する。(センサー→隊員→指揮本部)
- ⑦ 隊員がゾーン緑に移動した頃に指揮本部 PC から移動ノードへ通知を行う(指揮本部→隊員)。この通知を退去指示として、隊員は赤ゾーンまで戻り、移動ノードの外付けボックスのボタン操作で退場を行う。指揮本部では隊員の退場を確認する。

確認項目

1. アドホックネットワーク構築
2. ネットワーク構成確認
3. 隊員→指揮本部への通信
4. 指揮本部→隊員への通信
5. センサ情報による異常通知(隊員→指揮本部への通信)
6. 隊員のネットワーク参加と入退出の管理

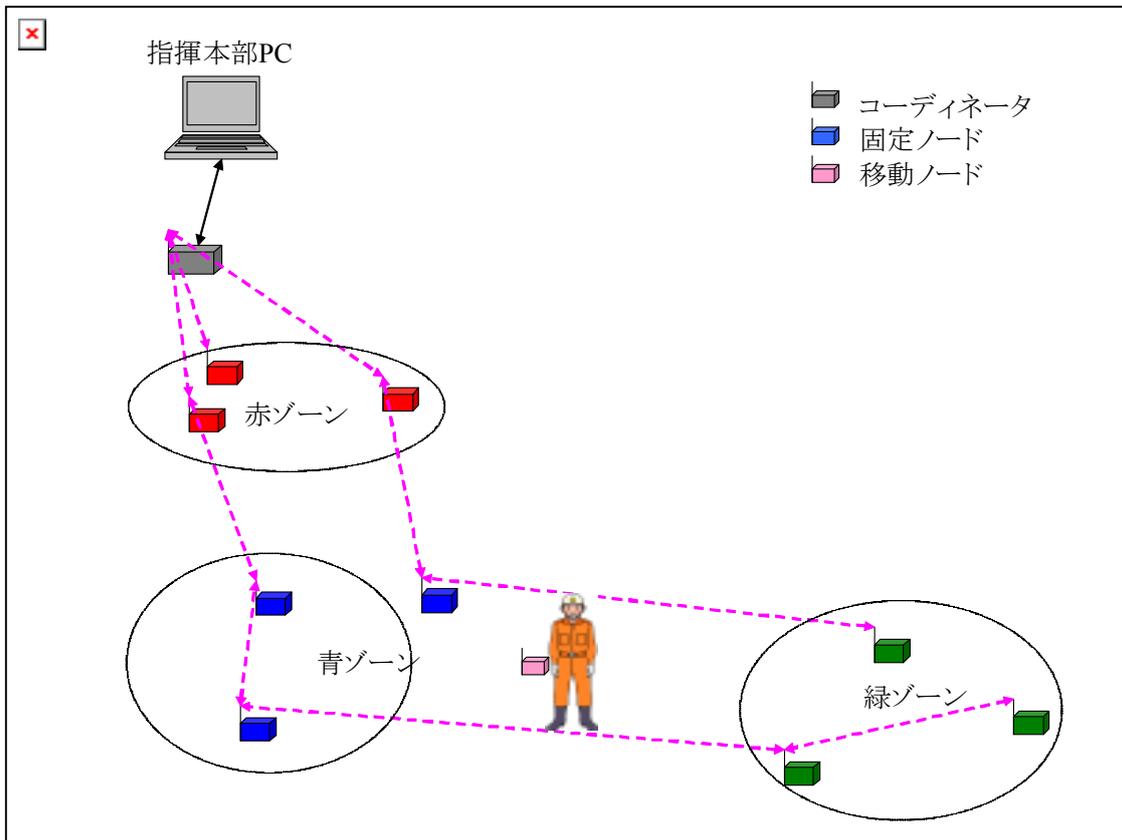


図 29 実証実験システム図

実証実験システムの概要を図 29 に示す。隊員の持つ移動ノードには、本件で開発した移動ノード対応機能を実装している。

また、指揮本部 PC の様子を図 30 に示す。



図 30 指揮本部 PC



図 31 ZC 外観

実証実験で使用したコーディネータ（タイプ D）を図 31 に示す。



図 32 タイプ C と外付けボックス外観

実証実験で使用した。タイプ C と外付けボックスを図 32 に示す。

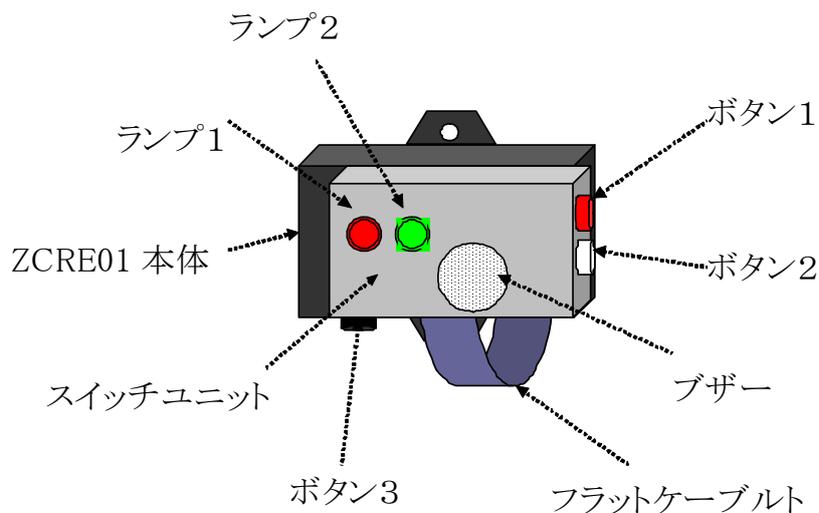


図 33 外付けボックス

図 33 に外付けボックスの各部の説明図を示す。また、その操作を表 6 に示す。

表 6 外付けボックスの操作

デバイス	操作・出力
ボタン1、2	どちらかのボタンを押下すると警報状態となり、上位に警報を送信し、ランプ1が点灯し、ブザーが鳴動する。両方同時に押下した場合は現場からの退場を上位に通知する。
ボタン3	ボタン3を押下すると警報解除となり、ブザーの鳴動を停止し、ランプ1が消灯する。上位に警報解除電文を送信する。
ランプ1(赤色)	警報表示ランプ
ランプ2(青色)	通知表示ランプ
ブザー	警報音
加速度センサ	隊員の動作状態を内蔵の3軸加速度センサにより計測し、閾値の範囲を超えたら警報ランプ1の点灯・ブザー鳴動を行い、上位に警報を送信する。

これらの装置を用いて実証実験を行い、

1. 開発した ZigBee の移動ノード対応機能を実機に実装し動作
2. シナリオによるシステムレベルの有効性
3. 消防隊員のメタル服の無線への影響を確認した。

(1) 実証実験スケジュール

実証実験は、京都市消防局の協力の下で下記のように行った。

日時：平成 20 年 3 月 7 日(金) 10 時～15 時

場所：①京都市消防局 本局(鉄骨建物 地下 1 階)

住所：京都市中京区押小路通川原町西入榎木町 450 番地の 2

②京都市消防活動総合センター(木造建物)

住所：京都市南区上鳥羽塔ノ森下開ノ内 94 番地の 4

実証実験対応者：京都市消防局 警防部 消防救助課 課長補佐 救助係長事務取扱
消防指令 吉田 豊

表 7 実証実験スケジュール

09:45	京都市消防局 本局ビル到着
10:00	地下 1 階シナリオ①セットアップ
10:15	シナリオ①
10:35	シナリオ②セットアップ
10:50	シナリオ②
11:10	撤収
11:20	移動(本局→消防活動総合センター)
13:15	京都市消防活動総合センター到着
13:30	木造シナリオ①セットアップ
13:45	シナリオ①
13:05	シナリオ②セットアップ
13:20	シナリオ②
14:50	機器撤収
15:00	終了

(2) 測定場所

(A) 鉄骨建物

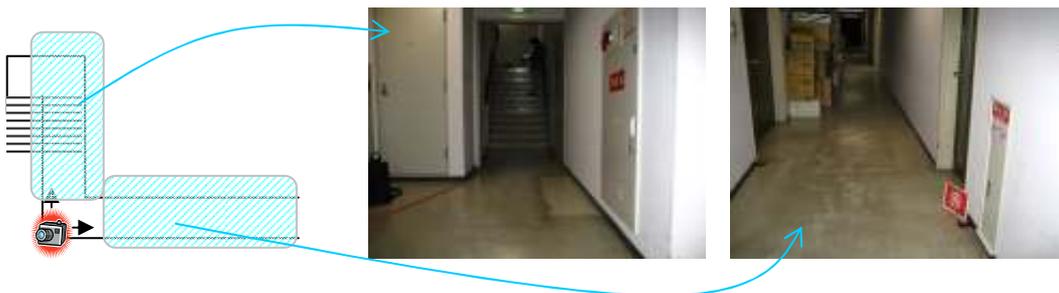


図 38 鉄骨建物

鉄骨建物は、一般的なビル地下の廊下、閉領域で床はコンクリートであった。その様子を図 38 に示す。

(B) 木造建物 2 階建

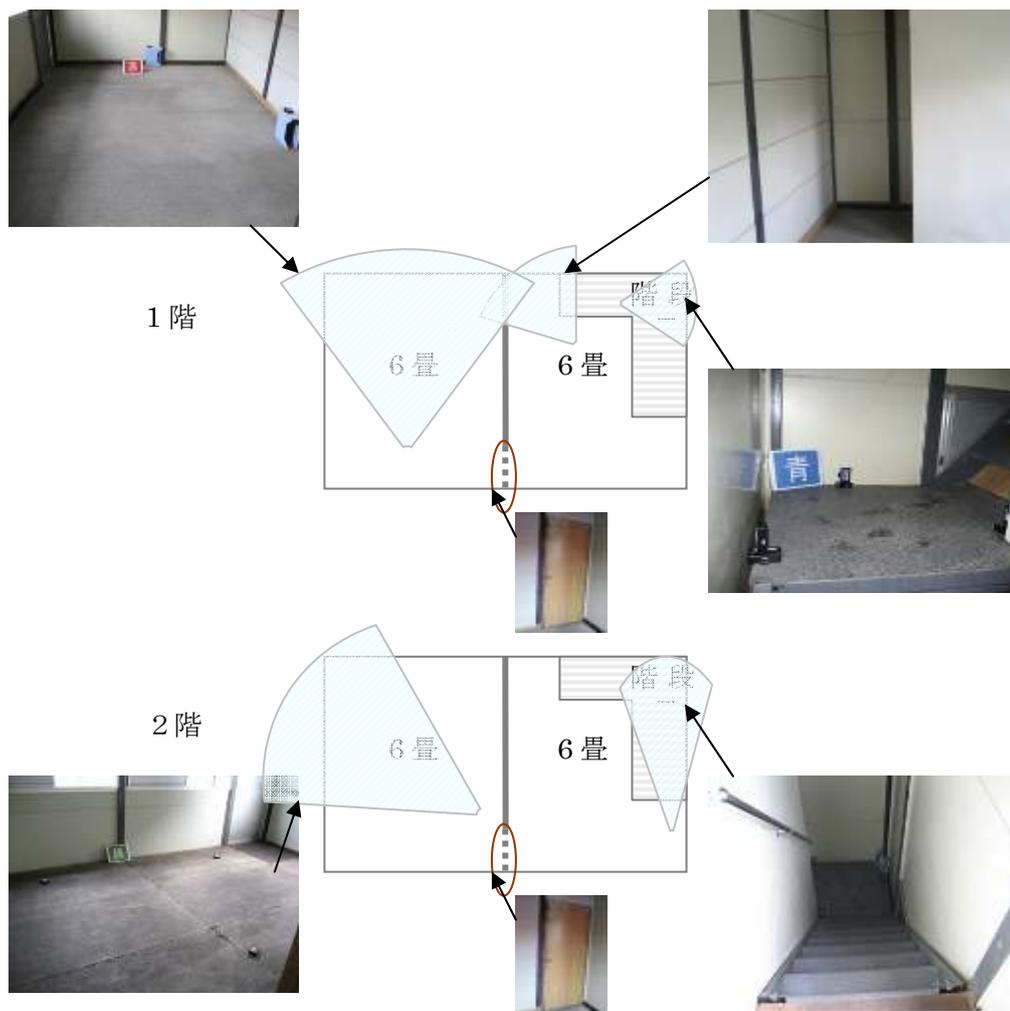


図 39 木造建物

木造建物は2階建ての木造プレハブであり、閉領域で床は木製であった。その様子を図39に示す。

いずれも実験場の広さは1000 m²内の閉領域内であり、移動者は消防隊員のメタル服(電波の反射の影響を調べる)を着用してもらった。図40に消防メタル服を示す。



図 40 消防メタル服

(3) 実証実験結果

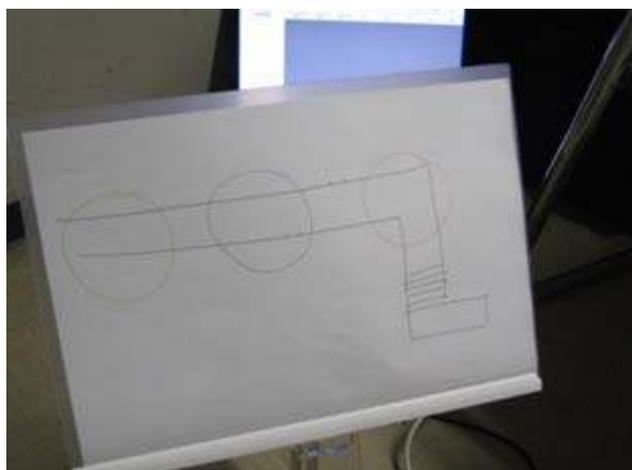


図 41 手書き現地地図

実際の消防現場では、図 41 に示すような現場の手書きの地図が使用される。本実証実験においても実際の活動にあわせて手書きの地図を作成し、赤、青、緑のゾーンを書き込んだ。

(A) シナリオ 1

ゾーン判定に使用した測定方法は次の通りである。固定ノードが 1 ホップ範囲指定で移動ノードに対してブロードキャスト送信を 1 秒間隔で定期的に行う。移動ノードは、固定ノードからのブロードキャスト送信を受信したら ZC 経由でホスト PC へ受信したパケットの RSSI 値とブロードキャストした固定ノードの番号を送信する。ホスト PC は移動ノードから送られてきた RSSI と固定ノード番号を記録する。

最も RSSI 値の高い固定ノードが属するゾーンを移動ノードが位置しているゾーンであると判定する。RSSI 値の差を考慮にいたった判定方法を用いればもっと優位性が確認できる結果が得られると思われるが、この方法でも十分に効果が確認できるのでこの方法を採用した。

鉄骨建物(地下1階)

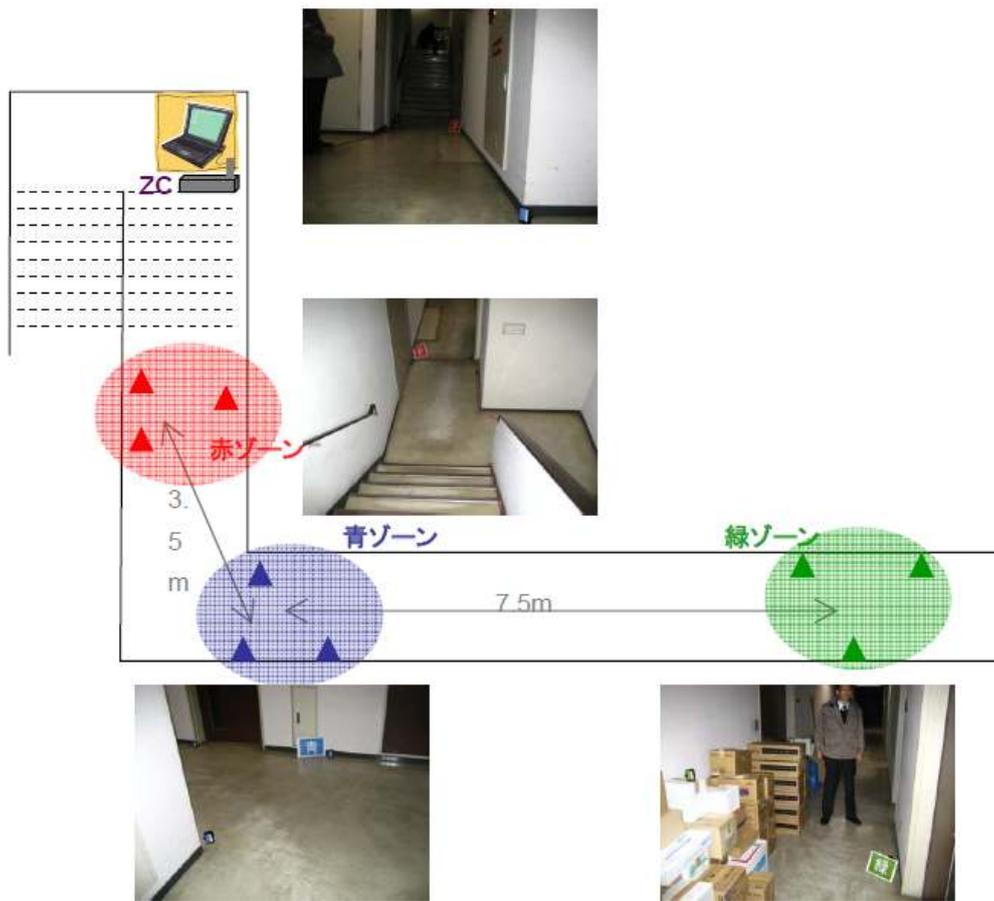


図 42 鉄骨建物ゾーン設定

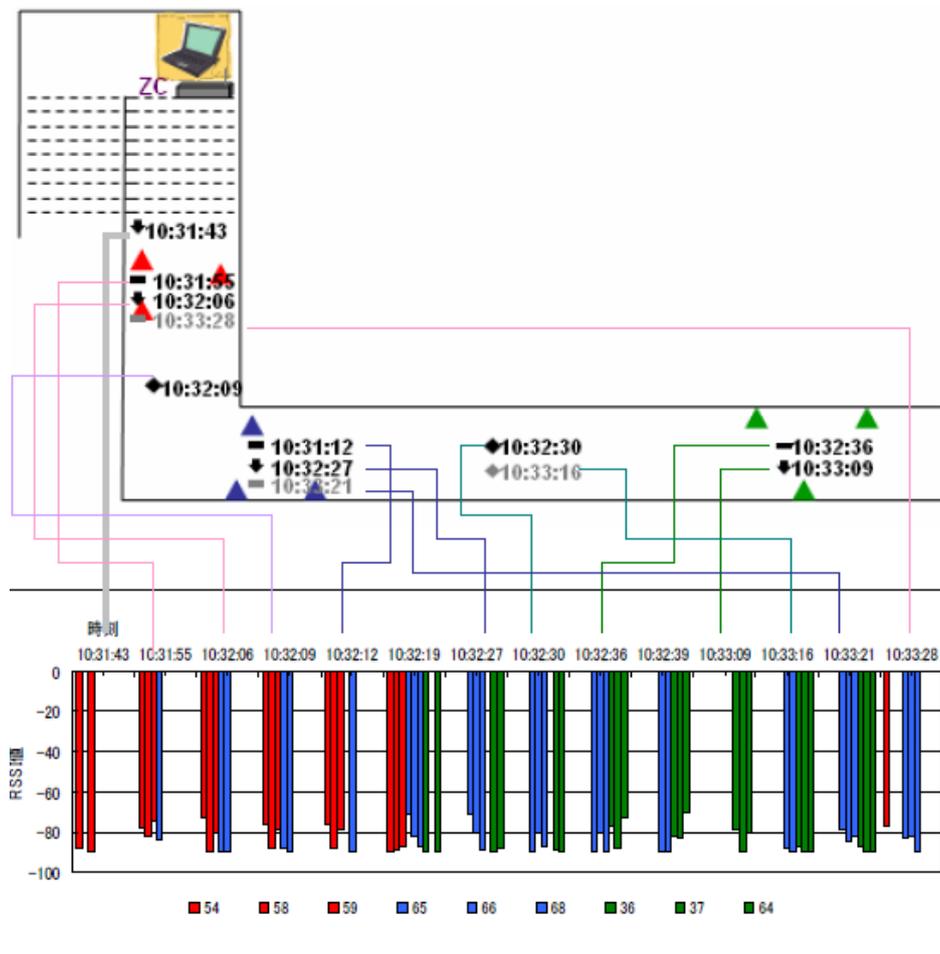


図 43 ゾーン判定結果

鉄骨建物では、図 42 に示すように赤、青、緑のゾーンを設定した。また、それぞれのゾーンでの RSSI 値を図 43 に示す。

全般的に、本方式によって移動ノードが移動したゾーンを正しく判定できることが測定結果から確認された。

- ① 移動ノードがゾーン内に停止した時のゾーン判定精度は 100%の好結果を得た。
- ② 当初予想された消防服(メタル)による実用上の影響はない。
- ③ 固定ノードの個数は 3 個以上必要。
- ④ 確実に移動ノードがそのゾーンにいることを判定するためには、開発した移動ノード対応機能による join/leave 処理発生を考慮にいと最大 7 秒程度の時間が必要。

木造建物

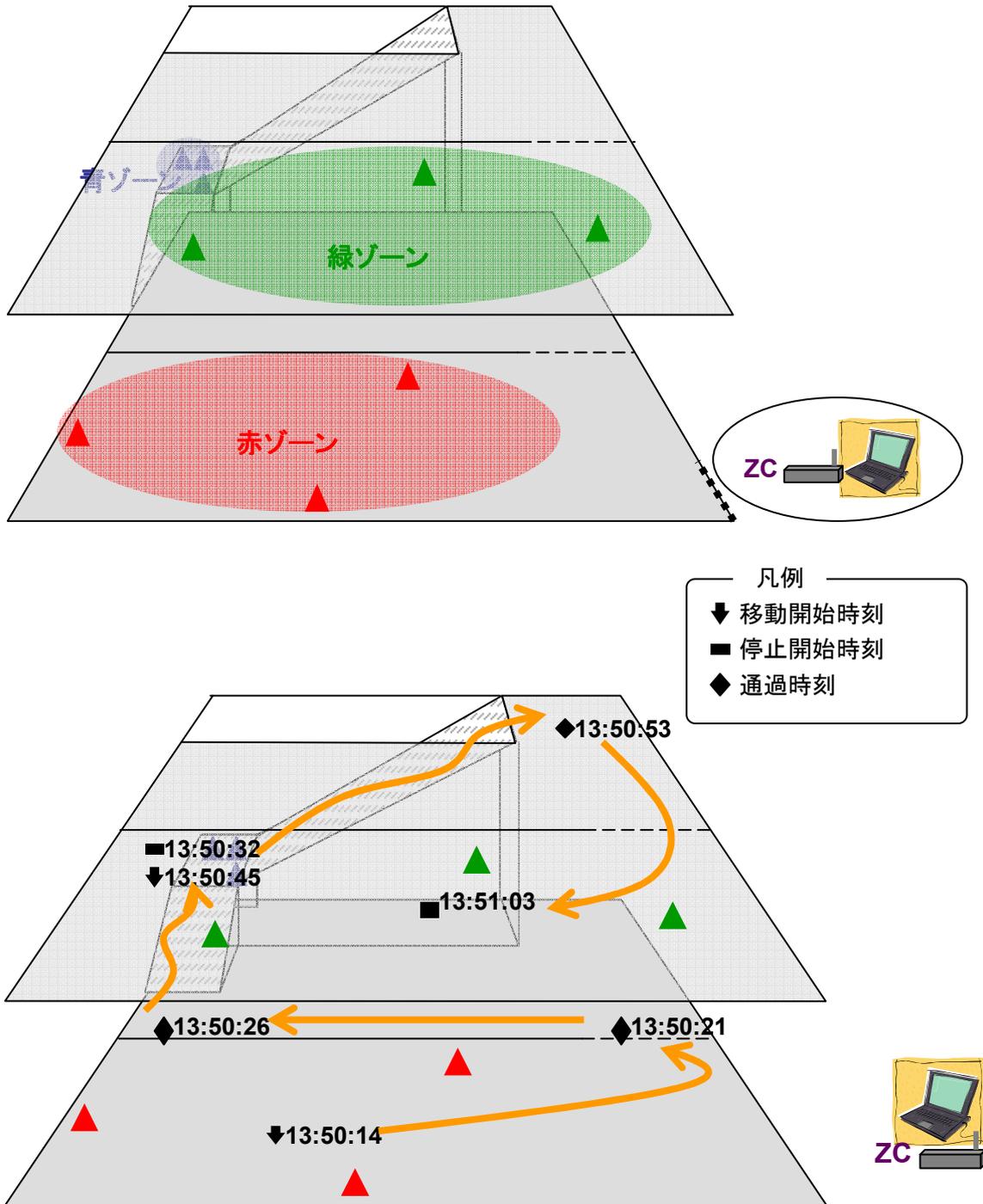


図 44 木造建物

木造建物では、図 44 に示すように赤、青、緑のゾーンを設定した。

- ① 木造 2 階家屋においても、移動ノードがゾーン内に停止した時のゾーン判定精度は、100%の好結果を得ることができた。
- ② 当初予想された消防服(メタル)による実用上の影響はない。

(B) シナリオ 2

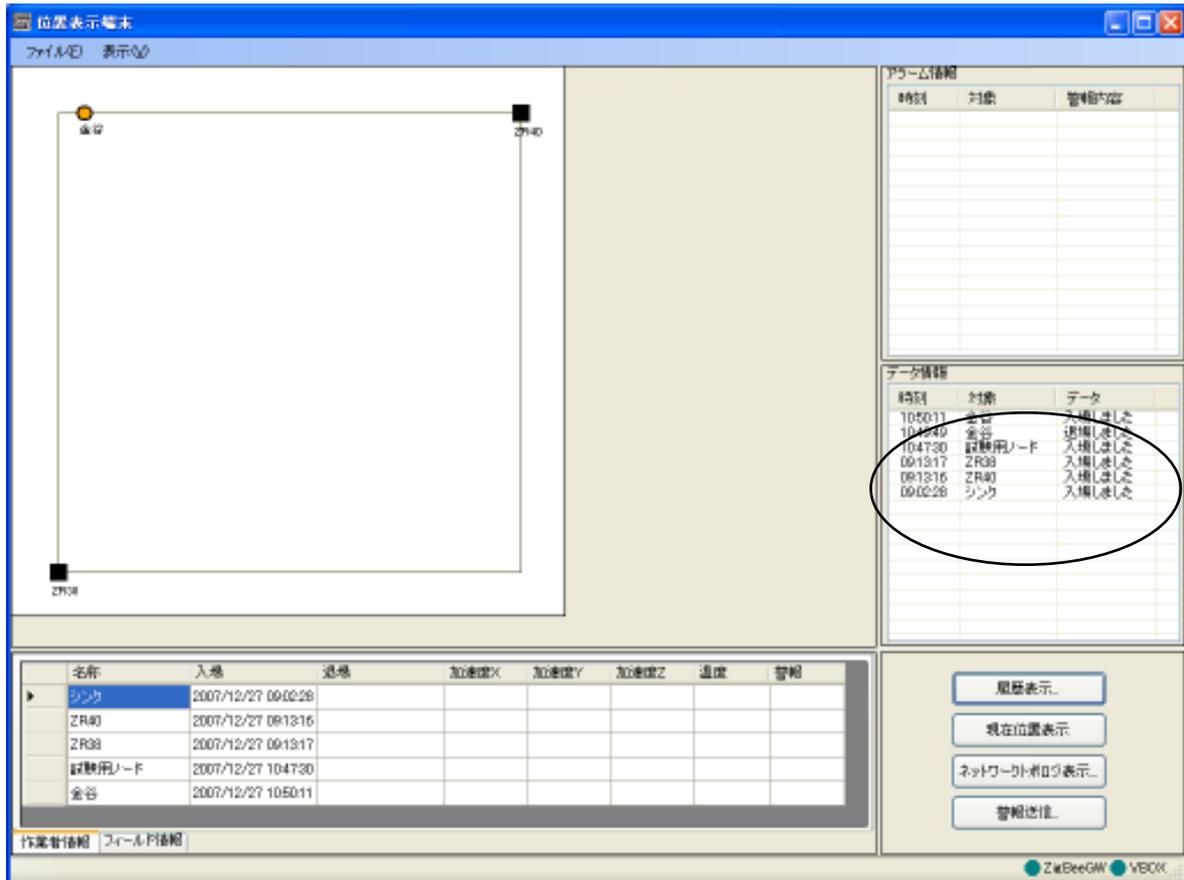


図 45 指揮本部 PC 画面イメージ

シナリオ 2 でもシナリオ 1 と同様なゾーン設定で行った。図 45 に指揮本部 PC の画面イメージを示す。移動ノードの電源 ON として、ZigBee ネットワークに参加すると数秒程度で指揮本部 PC の右側中央部のウィンドウに隊員の入場が表示された。

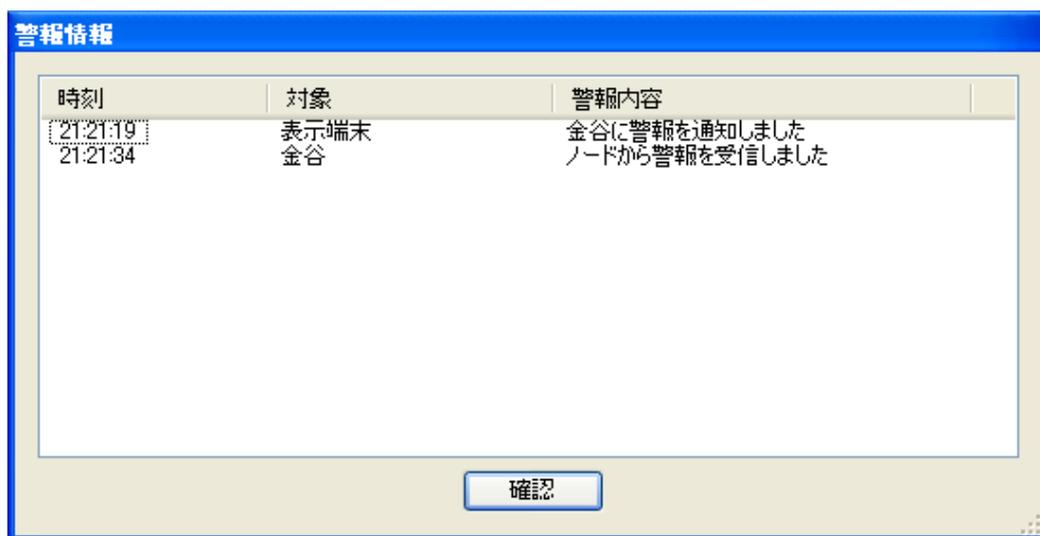


図 46 隊員→指揮本部 PC

赤ゾーンで隊員が外付けボックスのボタン操作を行う、青ゾーンで移動ノードを振ると数秒後に指揮本部 PC には図 46 に示すポップアップ画面が表示された。

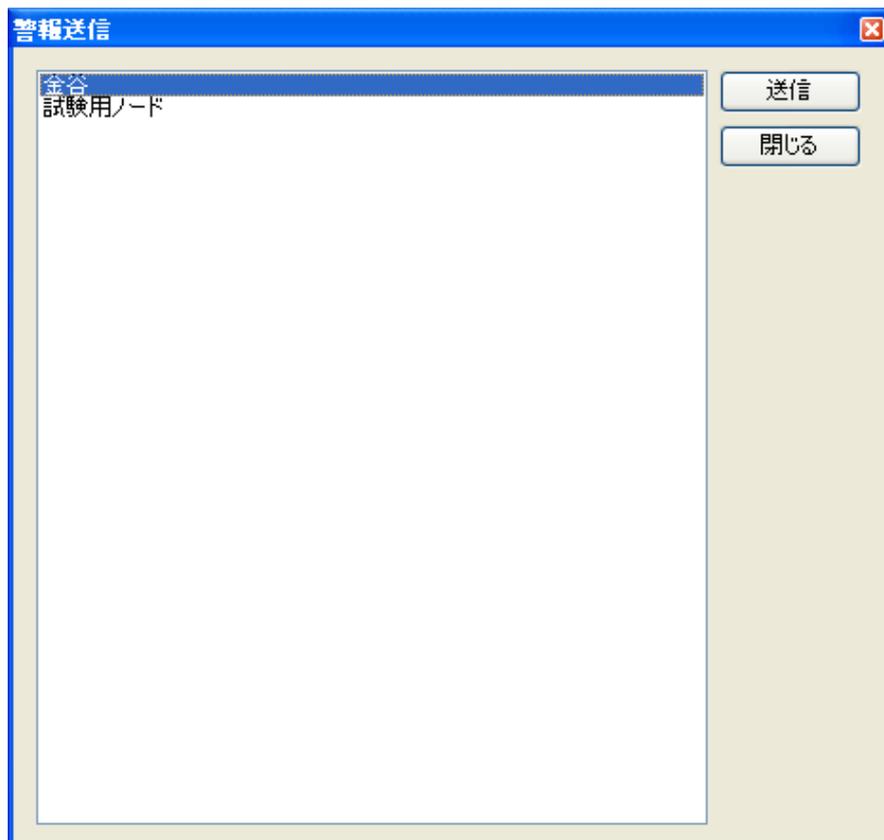


図 47 指揮本部 PC→隊員

指揮本部 PC で図 47 に示すように隊員を選択すると、指揮本部 PC→隊員への通知が送信される。数秒の遅延で隊員の持つ外付けボックスの LED が点滅してブザーが鳴った。

隊員が外付けボックスの操作を行う事で隊員の持つノードはネットワークから離脱する。指揮本部 PC には退場と表示された。

鉄骨・木造建物共に、

1. アドホックにネットワークを構成
2. ネットワークの参加・離脱で隊員の入退出管理
3. RSSI によるゾーン判定によって隊員の居場所管理
4. 指揮本部—隊員間の双方向通信で現状のロープに替わるコミュニケーション手段が確認できた。

4-3-3 達成状況

実証実験を計画通り行い目標を達成した。

開発した ZigBee の移動対応機能を実機に実装し、鉄骨、木造ともに確実に動作した。また、シナリオを基づくシステムの有用性検証として、現場で無線ノードをばら撒くイメージで設置を行い、鉄骨、木造共にアドホックにネットワークを構築し、移動ノードのネットワーク参加・離脱で隊員のネットワーク参加と入退出管理を行い、RSSI によるゾーン判別によって隊員の居場所を管理し、双方向通信によってロープに替わる指揮本部—隊員間の通信手段を提供でき有用性が示せた。

4-4 総括

本委託業務の計画を立案した時点から 2 年半が経過し、その間 ZigBee は ZigBee1.0 から ZigBee-2007 まで改良されたが、本委託業務で掲げた課題はまだ ZigBee としては十分に解決されておらず、本研究成果は有効に活用できる。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

研究発表：

- 1) 福永 茂 “ZigBee の標準化動向” 電子情報通信学会 総合大会パネル討論 2007 年 3 月
- 2) 柳原 健太郎、福井 潔、野崎 正典、福永 茂 “マルチホップセンサネットワークにおける消費電力均等化方式” 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会 2007 年 3 月
- 3) 福永 茂 “パーソナルエリアネットワークを実現する技術-ZigBee-” 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン 2007 年 9 月
- 4) 柳原 健太郎、福井 潔、野崎 正典、福永 茂 “マルチホップセンサネットワークにおける非対称経路を用いた省電力化方式” 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会 2008 年 3 月
- 5) 野崎 正典、柳原 健太郎、福井 潔、福永 茂 “ZigBee センサネットワークにおける透過的ブリッジ接続手法” 電子情報通信学会 総合大会 2008 年 3 月
- 6) 福井 潔、柳原 健太郎、野崎 正典、山内 雅喜、福永 茂 “ZigBee ネットワーク移動対応方式の開発” 電子情報通信学会 総合大会 2008 年 3 月