

## はじめに

現在、いつでも、どこでも、誰でも、何でもがネットワークにつながる「ユビキタス社会」が進展し、今や携帯電話などの通信端末だけでなく家電などもネットワークに繋がるようになっています。

I C T (情報通信技術) が進展するにつれて、多様なセンサーや無線 I C タグなどがネットワークと接続され、離れた場所にいる人や動物、自然環境などの様々な情報をリアルタイムに遠隔地において取得することが可能になってきました。

今回の「山間部における広域センサーネットワークの構築に関する調査検討会」がキーワードとしています「センサーネットワーク」は、その名のとおり位置、音量、照度、温度、降水量、流量などを検知し、遠隔地においてその情報の取得を可能とするものです。比較的簡単に構築でき、データの送信方式によっては、電池交換も長期間に渡って不要で、様々な環境において多様な情報の収集・伝送が可能な新しいネットワーク基盤として注目を集めています。

今回、センサーネットワークの使用を想定した周波数は、昨年5月から新たに使用が可能となった950MHz帯です。従来のセンサーネットワークは、主に2.4GHz帯が利用されておりましたが、950MHz帯は2.4GHz帯に比べて波長が長いことから、樹木などにより見通しの利かない山間部において使用した場合、電波の到達距離において優位と考えられています。

本調査検討会は平成20年7月1日に設置され、携帯電話などの情報通信インフラの整備が難しい山間部において、山間部特有のニーズに対応可能な通信ネットワークを新しいセンサーネットワーク技術により構築し、I C Tを利活用することによって得られる利便性について提案を行っています。また実際に、岩手大学農学部附属滝沢演習林をフィールド試験場所としてお借りし、山間部特有の地理的条件及び環境条件を勘案した電波伝搬試験や機能試験を行い、その有用性を確認してきました。

センサーネットワークは、①山間部での農林業における生産管理・営農情報の高度化への活用、②風水害、雪害及び火山災害等における気象情報等を収集し、迅速かつ適切な対策への活用、③動物の動態把握に活用し、有効かつ効率的な鳥獣被害対策への貢献、④森林セラピーやトレッキングなどの入山者の安全確保や情報管理への活用など、様々な分野において今後、有効に活用されることが期待されています。

本調査検討会の成果については、広く公表し、山間部における情報化の一助になれば幸いですと考えております。

本調査検討会には、各分野の方々にご参加頂き、また、東京や茨城などの遠隔地からもご参加頂きました。検討会及び作業部会委員の皆様のご協力とご支援に深く感謝いたします。また、フィールド試験場所をご提供いただきました岩手大学農学部附属滝沢演習林の関係者の皆様をはじめ、貴重なご意見、ご助言等を頂いた関係各位の皆様にも感謝申し上げます。

平成21年3月

山間部における広域センサーネットワークの構築に関する調査検討会  
座長 澤本 潤

## 第1節 調査検討会の目的と必要性

政府は、「e-Japan戦略」のもと2005年までに世界最先端のIT国家となるようブロードバンドの普及や安い料金設定などを目標に掲げその実現に向けて努力してきた。その結果、設定した目標を大きく上回る成果を上げることができた。

また、「u-Japan政策」では、これまでの有線中心のインフラ整備から、有線・無線の区別のないシームレスなユビキタスネットワーク社会への移行を目指しており、国民生活の隅々にまで融け込んだICT環境の整備を2010年を目途に実現するとしている。

さらに、「次世代ブロードバンド構想2010」や「次世代ブロードバンド戦略2010」等の政策掲げ、ブロードバンド・ゼロ地域の解消や超高速ブロードバンド（上り・下り双方向とも30Mbps級以上）を全世帯の90%以上で利用可能にすることなどを目標としている。

しかしながら、ユビキタスネットワーク社会の構築に向けた情報通信基盤の整備は、ある程度人口が密集した地域で着実に進展しているものの、地方の山間部では依然として立ち遅れているのが現状である。

ところが、そのような地域でも都市部とは形態を異にした独特の文化や地場産業があり、ここに情報通信基盤を展開できれば、産業の活性化、生活の安全、環境の保護など潜在する様々な課題の解決に大きく貢献できるものと考えられる。

その手段の一つとして、低廉で簡便、かつ、設置場所を制限されることなく自由に通信ネットワークが構築できるセンサーネットワーク技術がある。これは、センサーで検知した各種の情報をノードと呼ばれる中継機能を持った小型の小電力無線端末を複数設置することで実現されるものであり、その通信経路は通信状態に応じて各端末装置が自律的に設定するもので、従来は主に工場や事務所内で幅広く利用されてきた。

当調査検討会では、このセンサーネットワークを山間部に敷設することで、山間部が抱えている諸課題の解決に貢献できるものと考え、ニーズに基づく実用化を見据えた具体的なシステムについての提言を行うことを目的に検討を重ねてきた。

さらに、平成20年5月、アクティブ系小電力無線システム用として新たに割当された950MHz帯の電波の電波伝搬試験も行い、地形の起伏や樹木、積雪など山間部での利用環境を考慮しながらその優位性を検証する。

## 第2節 調査検討会の検討事項

検討会での主な検討事項は次のとおりである。

- 1 山間部における各種センシングニーズに対応した総合的なシステムの検討
- 2 システムの検討に基づくフィールド試験の実施及びシステムの有効性の評価
- 3 山間部における広域センサーネットワーク構築及び実用化に向けた課題と方策
- 4 その他関連する事項

## 第3節 調査検討会の開催

検討会の開催要綱、構成員、審議状況等の概要は、資料集の資料1から資料5に示す。

## 第2節 調査検討会の検討事項

検討会での主な検討事項は次のとおりである。

- 1 山間部における各種センシングニーズに対応した総合的なシステムの検討
- 2 システムの検討に基づくフィールド試験の実施及びシステムの有効性の評価
- 3 山間部における広域センサーネットワーク構築及び実用化に向けた課題と方策
- 4 その他関連する事項

## 第3節 調査検討会の開催

検討会の開催要綱、構成員、審議状況等の概要は、資料集の資料1から資料5に示す。



## 第1節 地形・人口・産業

## 1 東北地方の地形・気候

東北地方は広大な面積を有しており、総面積は約67,000km<sup>2</sup>と全国の約18%を占めている。

また、南北に連なる奥羽山脈・北上高地・出羽山地などの急峻な山々により太平洋側と日本海側に分けられている。主要都市は平地・盆地に点在している。

山地・丘陵地の占める割合に注目してみると、図2-1のとおり、全国平均値の72.8%に対して、岩手県が85.9%、福島県が80.5%など高い割合となっている。

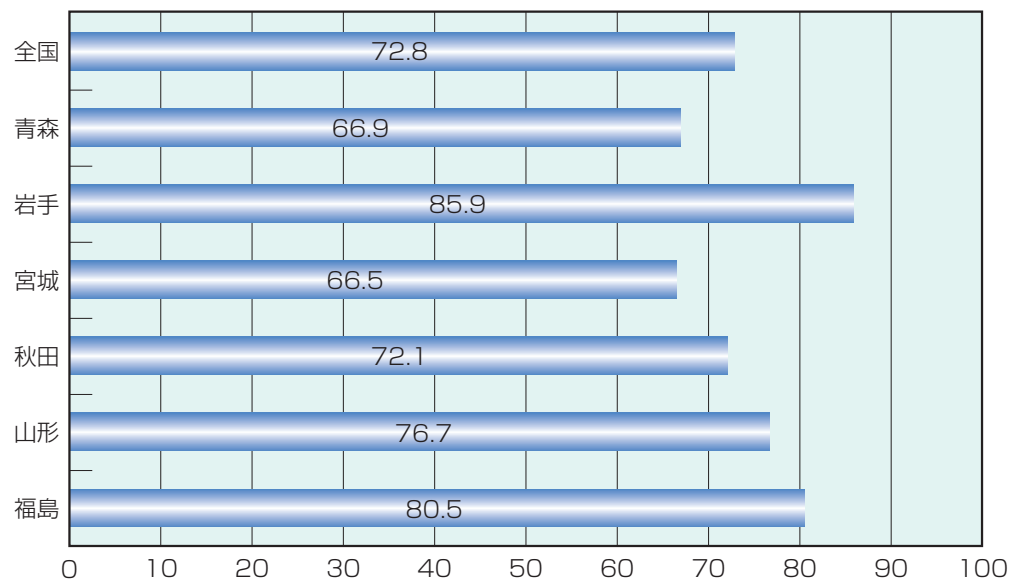


図2-1 県別山地等面積（山地・丘陵地の計）  
（資料：国土庁統計より）

気候的な特徴としては、冬季の寒さと積雪の多さにある。東北地方の8割が豪雪地帯に指定されている。また、盆地においては夏場の気温も高く、このような土地は一年を通して寒暖の差が激しいと言える。

また、統計的に地震多発地帯であり太平洋沿岸、日本海沿岸に多くの震源域を有しており内陸の直下型地震も散発している。さらに、岩手山のような火山活動履歴Bランクに位置付けされている山々も多く分布しており、自然災害は少なくない。

## 2 東北地方の人口

平成17年国勢調査では、東北地方6県の人口は約950万人と全国の7.4%を占める。

東北6県の年齢別割合は、全国平均値に比較すると15～64歳までの生産年齢人口割合が低く、65歳以上の老年人口の割合が5%ほど高くなっており、少子高齢化が顕著になっている。

※ 年少人口（0～14歳）生産年齢人口（15～64歳）老年人口（65歳以上）

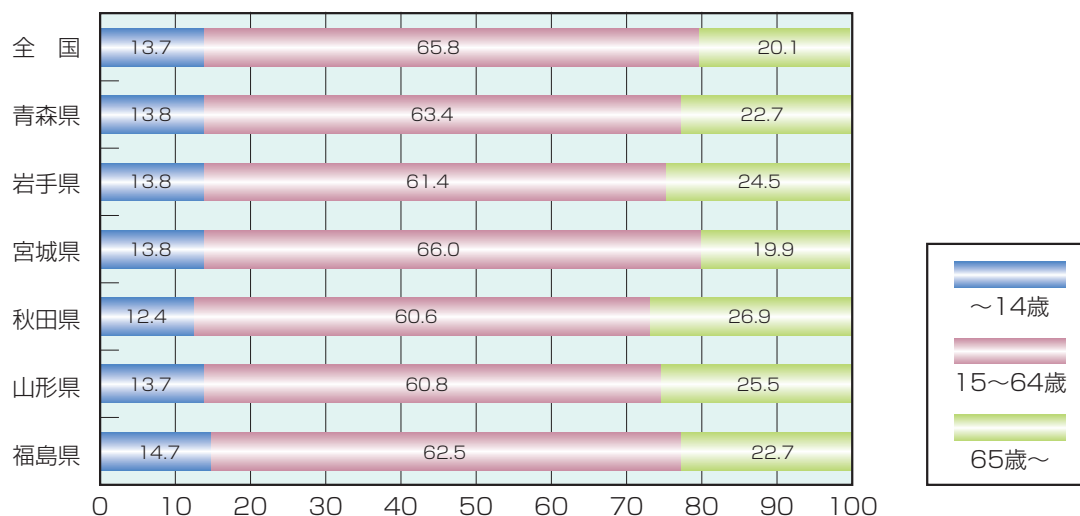


図2-2 県別年齢別人口割合（資料：平成17年国勢調査より）

## 3 産業別割合

産業別割合を見ると東北6県の第一次産業の割合は6.2～14%を占めており、全国平均の4.8%に比較すると非常に高い。

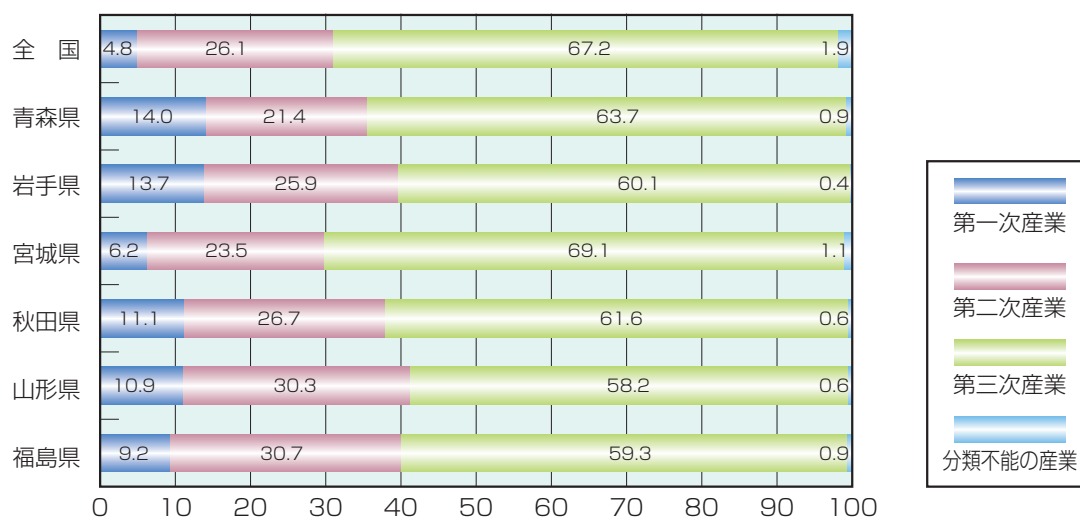


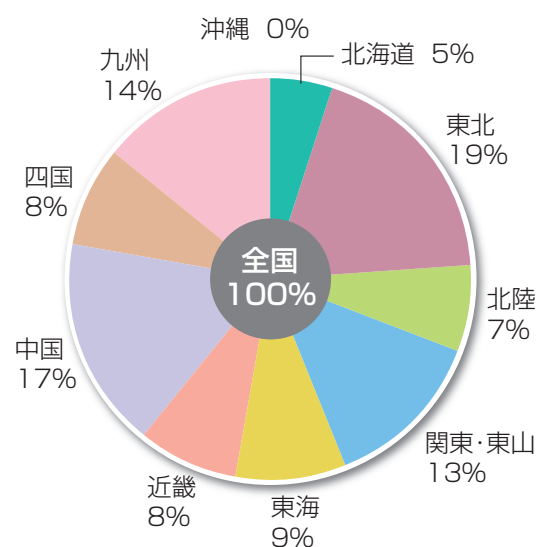
図2-3 産業別割合(県別・15歳以上)（資料：平成17年国勢調査より）

山間部において第一次産業の代表として林業がある。

林業を営む戸数（林家数）を地方別で見ると東北地方は最も多い。（図2-4参照）

県別比較では、全国第1位に47,000戸の岩手県、第3位に42,000戸の福島県となっている。

また、県の面積に占める林野面積の割合では表2-1のとおり、全国平均より高い割合となっている。



※北 陸：富山・石川・福井・新潟  
 ※関東・東山：茨城・栃木・群馬・埼玉  
 千葉・東京・神奈川・長野

図2-4 1 ha以上の面積を営む林家数の割合  
 （資料：2005年農林業センサスより）

表2-1 県別面積と林野面積

（単位：km<sup>2</sup>）

都道府県	総面積	林野面積	林野面積／総面積
全 国	377,923	248,609	65.8%
青 森	8,918	6,301	70.7%
岩 手	15,279	11,564	75.7%
宮 城	6,862	4,130	60.2%
秋 田	11,434	8,364	73.2%
山 形	6,652	6,433	96.7%
福 島	13,783	9,431	68.4%

（資料 総面積：平成18年10月1日 国土交通省  
 林野面積：平成17年2月1日 農林水産省より）

## 第2節 主な情報通信基盤の整備状況

データ伝送や通信のための最も身近な手段が携帯電話とブロードバンド網である。一般に山間部は人口密度が低く、また、情報通信基盤整備に要する経費も大きいため都市部に比較して整備は遅れている。

整備状況を以下にまとめた。全国平均と比較すると東北地方の整備が遅れていることが分かる。

### 1 携帯電話とブロードバンドの整備状況

表2-2 携帯電話のサービスエリア内人口比率

平成20年3月現在

全 国	99.8%
東 北	99.0%
青 森	99.5%
岩 手	97.4%
秋 田	98.8%
宮 城	99.8%
山 形	99.4%
福 島	98.6%

表2-3 ブロードバンド世帯カバー率

平成20年3月現在

全 国	98.3%
東 北	94.4%
青 森	94.7%
岩 手	90.7%
秋 田	93.0%
宮 城	98.3%
山 形	95.3%
福 島	94.4%



注1：市町村の行政区界は平成20年4月1日現在。  
 注2：ブロードバンド整備状況は、ブロードバンド・サービス（FTTH、ADSL、ケーブルインターネット等）について事業者情報等から、原則町丁目単位で利用可能の有無を区別し地図上に色塗りしている。色塗りした地域の全域でサービス提供されているとは限らない。

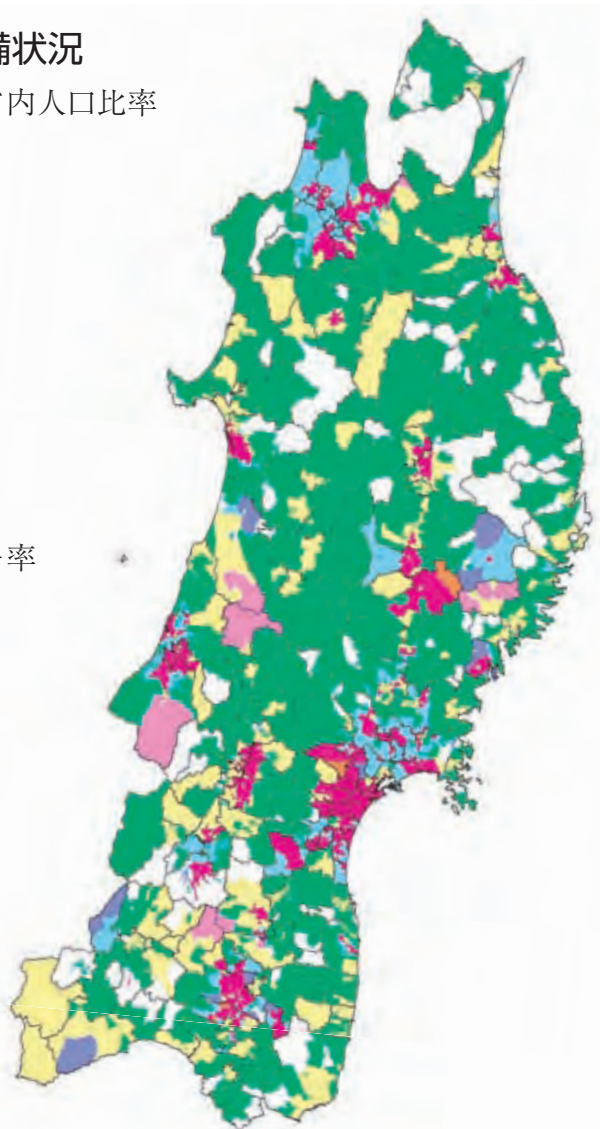


図2-5 ブロードバンド整備状況  
 （資料：平成20年3月総務省より）

## 2 情報通信基盤整備が遅れている要因

携帯電話やブロードバンド網の整備が遅れる理由として次のような事が考えられる。

- (1) 広大な面積、急峻な斜面、交通手段が無いなどの要因により、通信網を整備するために多大な労力を要する。
- (2) 整備工事の困難性に伴い多額の整備費用を要する。
- (3) 人口が少ないことから採算性に乏しい。
- (4) 高齢者層はインターネットに代表されるようなブロードバンド通信に興味がない。
- (5) 情報通信基盤整備のために地方公共団体が一部を負担する場合、地方公共団体が抱える財政難に加えて、情報通信基盤整備より優先させる地方行政施策があるため。

以上のように、東北地方には都市部を除き情報通信基盤整備が遅れている地域が多く分布しており、また、電気通信事業者が高度な情報通信基盤整備をするにも様々な障害があって急な進展は望めない。

もし、山間部等の不便な地域において利用者独自で安価で応用範囲の広い通信ネットワークが構築できれば、高度なユニバーサルサービスが利用できなくとも、様々な課題の解決につながると考えられる。

山間部における具体的なニーズとそれらに対する方策については、次節以降で記述する。

### 第3節 センサーネットワーク活用への期待

#### 1 山間部における産業分野への活用

##### (1) 林業

第1節で記述したとおり、東北地方は第一次産業の割合が全国平均値より高く、山間部の産業としては林業を挙げることができる。

この分野は高齢化と後継者不足に悩まされており、作業の効率化と省力化が課題となっている。

また、安全管理上においても情報通信技術が問題解決のツールとなることができると考えられる。

##### (2) 観光

国立公園など大自然を背景とした観光産業においては、従来からの景観を楽しむだけの観光からウェルネス系やセラピー系の森林浴、温泉浴、飛沫浴など新しい楽しみ方に変化しており、登山やトレッキングを楽しむ老若男女を含めると入山人口は増加している。

このような人々の管理（入山者管理）のために情報通信技術が果たせる役割は大きいと考えられる。

##### (3) 農業

鳥獣による平成19年度の農作物被害総額は全国で185億円に上っている。また、被害面積では91,000haと大きな打撃を受けている。被害の原因となっている主な鳥獣は、イノシシ、シカ、サルが上位を占めており、被害金額は順に50億円、47億円、16億円となっている。

このような動物に対して、センサーネットワークにより鳥獣を追い払ったり動物の接近を農家に知らせたりすることが可能となれば被害を減らすことができると考えられる。

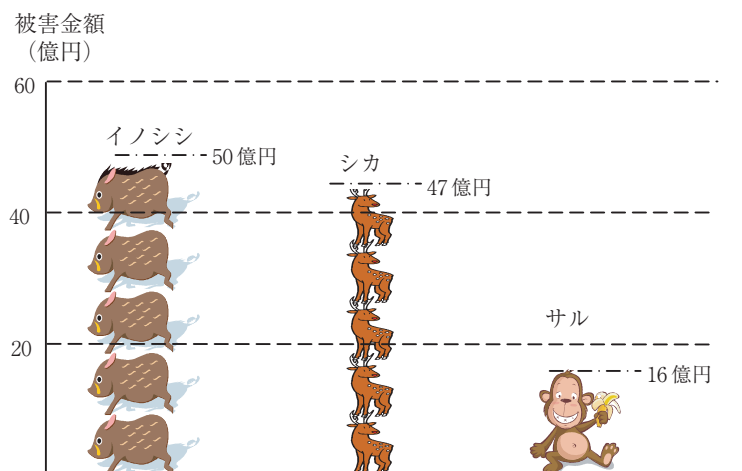


図2-6 主な動物による農作物被害金額  
(資料:平成19年度 農林水産省調査より)



## 2 安全で安心な暮らしへの活用

### (1) 動物による人身被害や交通障害

#### ア クマの出没状況と被害

環境省の統計によると平成19年度全国で47件50人がクマ類の被害に遭っている。そのうち、東北地方では21件23人を占めており全国の半数近い割合となっている。

また、クマの駆除数は表2-4のとおりであり、餌を求めて里に出没するケースが増加している。

センサーネットワークによりクマの接近を事前に感知して人に知らせたりクマに対しては音や光などで威嚇することができれば被害を相当減らすことができると考えられる。

表2-4 県別クマの駆除数

上位順		平成 8年度	平成 7年度
1	長野	697	119
2	山形	676	158
3	新潟	502	96
4	福島	423	57
5	群馬	325	36
6	秋田	314	31
7	福井	242	9
8	岩手	241	52
その他合計		5,113	1,175

(資料：環境省より)



#### イ 列車往来妨害の実態

平成19年度の東日本旅客鉄道株式会社盛岡支社管内における動物による列車運行障害件数は年間93件となっており、動物別ではニホンジカ66件、カモシカ21件、クマ2件、その他の動物4件となっている。さらに、立木や土砂が線路内に侵入して運行障害となった事例は34件を数える。

線路内に侵入しようとする動物をいち早くセンサーネットワークで感知し自動的に音声等で威嚇し追い払い、また、列車の運転士に対しても動物の侵入があることを当該地点通過前に警告できれば事故の未然防止策として大変有効である。



図2-7 動物による列車運行妨害のイメージ

(2) 防災への活用

山間部は例年大雨や地震等が原因となる地滑りや斜面の崩落、落石など自然災害に見舞われる。このような場合、例えば、住民が暮らしている裏山に地滑りセンサーネットワークを設置し防災行政無線と接続することにより役場等の防災関係機関に必要なデータを自動的に伝送することができ、また、同時に住民へ避難を呼び掛けることも可能となる。未然に被害を阻止し、また、災害が発生してしまった場合でもいち早くその状況を把握することができる有効な手段となり得る。

火山活動の遠隔観測としての活用も考えられる。

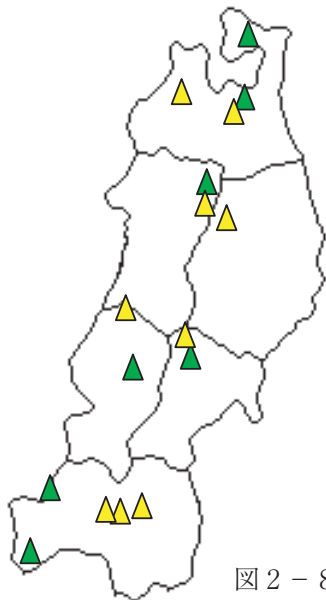


図2-8 東北地方の主な活火山（ランク別<sup>1</sup>）

表2-6 東北地方の主な活火山一覧

ランク	東北地方の活火山の名称
Aランク（赤）	該当なし
Bランク（黄）	岩木山，十和田，秋田焼山，岩手山，秋田駒ヶ岳，烏海山，栗駒山，蔵王山，吾妻山，安達太良山，磐梯山
Cランク（緑）	恐山，八甲田山，八幡平，鳴子，肘折，沼沢燧ヶ岳

<sup>1</sup> ランクは火山学的に見た過去の長期的な火山活動の履歴を表し、AからCまでの3つ分類されている。一方、活動レベルは現在の火山活動や防災対応の必要性を示すもので0から5までに区分されている。

### 3 学術的な研究や自然環境保護への活用

#### (1) 動物の行動や生態調査

クマやニホンジカ等山間部に生息している動物の行動様態や移動範囲は学術的に明らかになっていない点が多い。動物に情報発信器を取り付け、センサーノードを山中に分散配置することで位置や体温等を知ることができる。従来から同様の方法による動物の追跡技術はあるが、動物体に取り付ける装置が大きいことや電池の寿命の問題もあり研究者からは改良を望む声があった。

センサーネットワーク構築の代表的な手段であるZigBee(P 21参照)を利用すれば、このような問題の解決に糸口が見えるであろう。

#### (2) 環境モニタリングと自然環境の保全

二酸化炭素センサー、温度センサー、様々な化学物質のセンサーを必要に応じて無線ノードに接続してネットワーク化することで環境モニタリングが可能となる。

自然環境保護として、山火事の早期発見や火山の噴火予告などへの活用も考えられる。

## 第1節 センサーネットワークを構築するための無線技術

センサーネットワークを構築するための無線技術として幾つかの選択肢がある。短距離の通信方式であるUWB<sup>1</sup>やBluetooth<sup>2</sup>などは既に各種電子機器や家電製品などに実装されており、これらの規格を用いたセンサーネットワークの構築も考えられるが、最も適している通信方式は最初からセンサーネットワークを意識して策定された方式であるZigBee（ジグビー）である。（ZigBeeについては第2節を参照）

ZigBeeを用いたセンサーネットワークの最大の特徴はアドホックネットワーク・マルチホップと称される通信技術である。この技術は、複数のセンサーノードが自律的に自動中継を行うことを特徴とし、このことが設置場所に制限されない自由なネットワークの構築と通信可能区域の拡張を可能とした。（アドホックネットワーク・マルチホップ通信については第2節を参照）

800/900MHz帯の電波を使用するZigBeeは既に欧州や米国で規格化され実用に供されてきたが、我が国では専ら2.4GHz帯が使用されてきた。この2.4GHz帯の電波は障害物の多い場所での伝搬損失が大きいことに加え、無線LANなどの機器と周波数が共用されていることが原因で混信を受けてしまうこともあり、条件によっては利用者が満足できる十分な通信距離を確保することが困難であった。このため、障害物があっても電波の透過性に優れ、また、回り込み特性も良好で混信の無い950MHz帯の割当を望む声が高まってきた。このような経緯を踏まえ、平成20年5月に小電力アクティブタグ系無線システム用として950.8MHz-955.8MHz（バンド幅5.0MHz）の電波が新規に割当されるに至った。

本調査検討会では電波伝搬条件の厳しい山間部におけるセンサーネットワークの構築を前提としたため、950MHz帯の電波伝搬試験及びこれに付随する簡単な機能試験を行った。本章では、950MHz帯のWPAN<sup>3</sup>（Wireless Personal Area Network）の技術的諸元及びこの条件に基づき提案されている950MHz帯を利用するZigBeeについて記述する。

なお、2.4GHz帯の周波数を使用するセンサーネットワークに関する無線技術については本章では割愛する。

- 1 超広帯域無線。データを1GHz程度の極めて広い周波数帯に拡散して送受信を行なう。IT用語辞典e- Words (<http://e-words.jp/>) より抜粋。
- 2 読み方はブルートゥース 携帯情報機器などを数m程度の範囲で機器間接続を行うために使われる短距離無線通信技術の一つ。IT用語辞典e- Words (<http://e-words.jp/>) より抜粋。
- 3 机上に並べた機器相互の接続に使うくらい狭い範囲の通信ネットワーク。WはWirelessの頭文字で無線を意味する。

# 1 総務省が定める950MHz帯小電力アクティブ系無線システムの技術的条件【無線設備規則及び関係告示から抜粋】

## (1) 一般事項

### ア 通信方式

単向方式 単信方式 複信方式 半複信方式 又は放送

### イ 変調方式

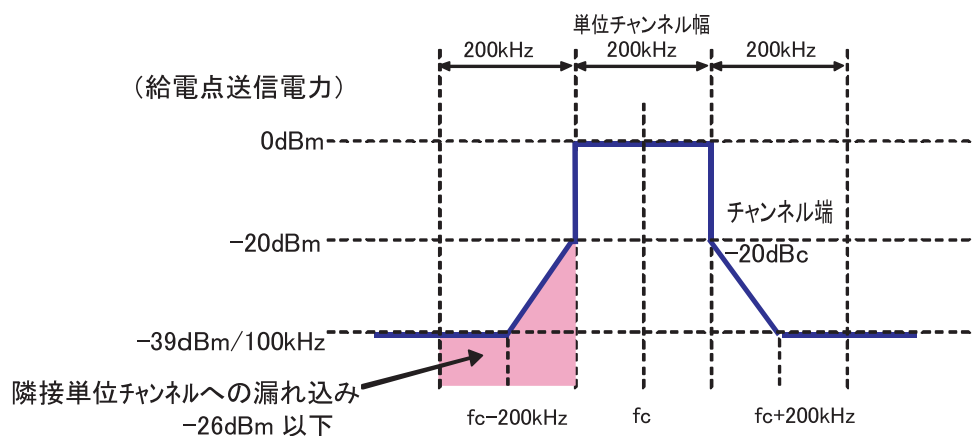
規定しない

### ウ 周波数帯

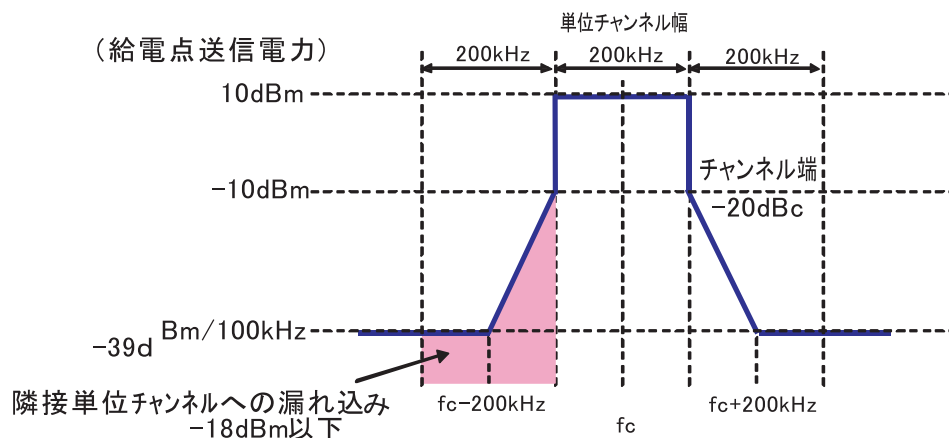
950.8MHz - 955.8MHz (5.0MHz)

### エ チャンネル構成

チャンネルの帯域の中心周波数が951.0MHzから955.6MHzまでの200kHz間隔  
24チャンネル

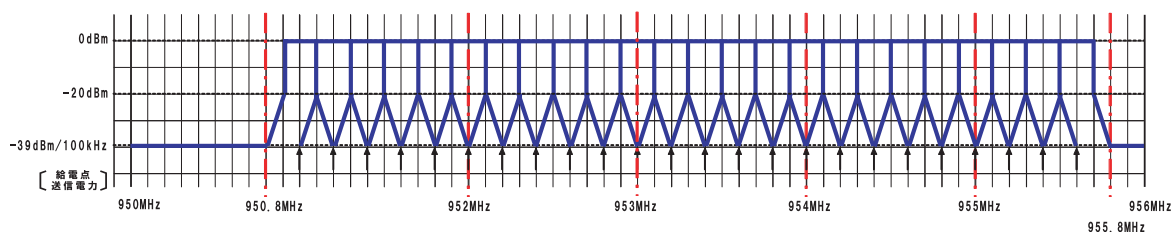


(a) 1mW の場合

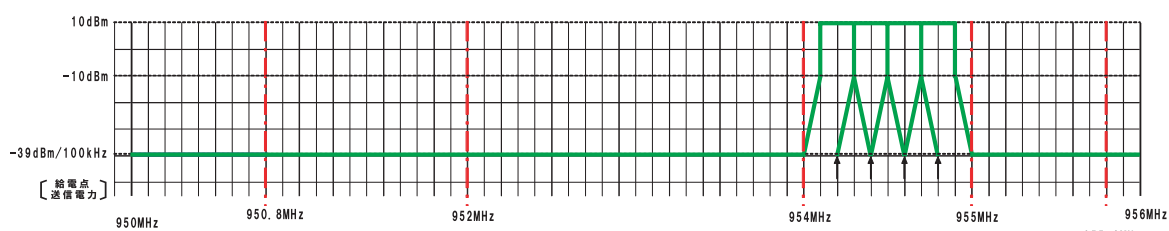


(b) 10mW の場合

図3-1 チャンネルマスク



(a) 1mW の場合



(b) 10mW の場合

図 3 - 2 950MHz 帯チャンネル配列

オ 無線チャンネル

最大 3 チャンネル分の帯域を同時に使用可能

カ 空中線電力

1 mW以下 但し、954.2MHzから954.8MHzまでのチャンネルを使用するものについては10mW以下

キ 空中線利得

最大 3 dBiとする。但し、実効輻射電力がカで規定している空中線電力を 3 dBi の利得を有する空中線に給電した場合の実効輻射電力を越えない範囲でこれを越えることができる。

ク システムデザイン

(ア) キャビネット

A 無線装置は電源供給部及びコントロールユニットを除き容易に開けることができず、開けられないものであること。

(イ) キャリアセンス

A 無線装置は、電波を発射する際に前もって干渉のないことを確認するものであること。

B キャリアセンスは、発射するチャンネルを含む全てのチャンネルにおいて 128  $\mu$  秒以上の間行われるものであること。

C キャリアセンスを行う受信電力レベルは、発射するチャンネルを含む全てのチャンネルにおいて空中線入力端において -75dBmとする。



D 送信電力 1 mW以下の場合又は送信制御方式がウに規定するキャリアセンスが無い場合は、キャリアセンスは不要である。

(ウ) 送信制御

A キャリアセンス時間が10m秒以上の場合

電波の送信は発射から 1 秒以内に停止するものであり、その後の発射は100 m秒の待機を経て行うものとする。但し、最初の電波発射終了後 1 秒以内に、1 秒以内の送信を行う場合は100m秒の待機は不要である。

B キャリアセンス時間が128  $\mu$  秒以上の場合

電波の送信は発射から100m秒以内に停止するものであり、その後の発射は100m秒待機した後に行うものとする。また、1 時間内の合計送信時間は360秒以下であること。但し、最初の電波発射終了後100m秒以内に、100m秒以内の送信を行う場合は100m秒の待機は不要である。

C キャリアセンスが無い場合

電波の送信は発射から100m秒以内に停止するものであり、その後の発射は100m秒待機した後に行うものとする。また、1 時間内の合計送信時間は3.6秒以下であること。但し、最初の電波発射終了後100m秒以内に、100m秒以内の送信を行う場合は100m秒の待機は不要である

ケ インターフェース保護

無線装置は、自動的に識別コードを送受信するものであること。

コ 通信装置端末

(ア) 48ビット以上の識別コードを有するものであること。

(イ) 特別なケースを除き、チャンネルが使用されているか否かを事前に判断できるものであり、空きチャンネルと判断した場合のみ使用するような仕組みとなっていること。

(2) 技術的条件

ア 送信装置

(ア) チャンネル間干渉

チャンネルの周波数帯域幅は  $(200 \times n)$  kHz とする。帯域端の放射電力はキャリアレベルより20dB低いものとし、その電力レベルは空中線電力 1 mW 以下の場合  $-20\text{dBm}$  以下、空中線電力が 1 mW を越える場合は  $-10\text{dBm}$  以下とする。隣接するチャンネルにおける電力は、送信電力が 1 mW 以下の場合  $-26\text{dBm}$  以下、1 mW を越える場合は  $-18\text{dBm}$  以下とする。(n は同時に n 個の複数チャンネルを使用する場合 1 から 3 までの整数を代入)

- (イ) 周波数許容偏差  
百万分の20以下
- (ウ) 許容占有周波数帯域幅  
( $200 \times n$ ) kHz 以下 (n は同時に n 個の複数チャンネルを使用する場合 1 から 3 までの整数を代入)
- (エ) 空中線電力の許容偏差  
上限20% 下限80%
- (オ) スプリアス発射の強度  
アンテナ入力端子におけるスプリアス電力の許容値は表 3 - 1 に記載した値以下であること。

表 3 - 1 スプリアス発射の強度 (アンテナ入力端での値)

周波数帯	スプリアス発射の強度 (平均電力)	リファレンス BAND幅
$f \leq 1 \text{ GHz}$ (710MHzを越え960MHz以下を除く)	-36dBm	100kHz
$710\text{MHz} < f \leq 945\text{MHz}$	-55dBm	1 MHz
$945\text{MHz} < f \leq 950\text{MHz}$	-55dBm	100kHz
$950\text{MHz} < f \leq 956\text{MHz}$ ( $ f - f_c  \leq 200 + 100 \times (n - 1)$ kHzを除く)	-39dBm	100kHz
$956\text{MHz} < f \leq 958\text{MHz}$	-55dBm	100kHz
$958\text{MHz} < f \leq 960\text{MHz}$	-58dBm	100kHz
$1 \text{ GHz} < f$ (1884.5MHz < $f \leq 1919.6$ MHzを除く)	-30dBm	1 MHz
$1884.5\text{MHz} < f \leq 1919.6\text{MHz}$	-55dBm	1 MHz

- (カ) 筐体からの輻射  
キャビネットからの不要実効輻射電力は表 3 - 1 のスプリアス発射の許容電力値以下であること。

イ 受信装置

副次的に発射する電力は 1 GHz 以下の周波数 (710MHz - 960MHz の範囲を除く) 及び 950MHz - 956MHz においては -54dBm/100kHz 以下、1 GHz 以上の周波数 (1884.5MHz - 1919.6MHz の範囲を除く) においては -47dBm / 1 MHz 以下とし、これらの周波数以外においては表 3 - 1 のスプリアス発射の強度以下とする。

## 2 IEEE（電気・電子学会）とセンサーネットワーク技術

IEEEは、世界最大の電気・電子分野の学会であり新たな技術の標準化を定める組織である。技術分野ごとに委員会が設置され、これら委員会には幾つかのWG（Working Group）が設けられる。また、WGには必要に応じてさらにTG（Task Group）が置かれる。

センサーネットワーク関連技術で最も関係の深いのはIEEE802委員会である。この委員会はワイヤレス通信の標準化を担っており、ワイヤレス通信方式は図3-3に示すとおりWLAN<sup>1</sup>（Wireless Local Area Network）、WMAN<sup>2</sup>（Wireless Metropolitan Area Network）及びWPAN（Wireless Personal Area Network）に分類整理されており、センサーネットワーク技術は主にWPAN領域で実用化されるものである。

なお、IEEE802.15で標準化されている無線WPANは、表3-2のとおり規格毎にTGが設けられている。

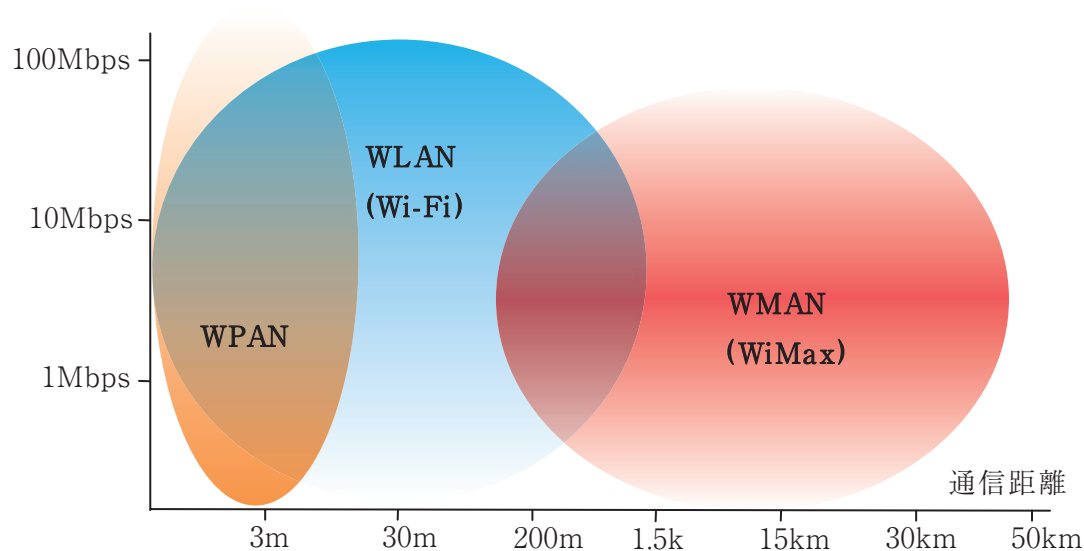


図3-3 IEEE802の各通信方式と守備範囲

1 オフィス、大学等の限られた範囲内の通信ネットワーク。Wは無線を意味する。IT用語辞典e- Words (<http://e-words.jp/>) より抜粋。  
2 ひとつの都市（メトロポリタン）の範囲を結ぶ通信ネットワーク。

表 3 - 2 IEEE802.15とTG (Task Group)

TG	規格名	使用周波数	最大伝送速度	通信距離
802.15.1	Bluetooth	2.4GHz帯	2/3 Mbps (ver. 2.0)	10m程度
802.15.3a	UWB	3.1~10.6GHz帯	480Mbps	10m程度
802.15.3c	UWB	60GHz帯	2Gbps以上	—
802.15.4	ZigBee	2.4GHz帯/915MHz帯/868MHz帯	250kbps	100m程度
802.15.4a		2.4GHz帯/UWBインパルス無線	数Mbps	—
<u>802.15.4d</u>		<u>950MHz帯</u>	<u>100kbps</u>	—

### 3 950MHz帯を利用するZigBeeについて (IEEE802.15.4d)

表 3 - 2 の下線で示したIEEE802.15.4dは、平成20年に日本における950MHz帯PAN<sup>1</sup>のZigBee技術に関する標準化を目的に立ち上げされたTGである。現在はこのTGでの審議を終了し上位組織であるRevCom<sup>2</sup>という委員会で諮られる予定となっている。参考までに、その提案内容を紹介する。

提案されている方式は、BPSK-DSSS方式とGFSK方式があり、平成21年2月時点では、2つの方式が両方とも採用される見込みである。

- (1) 変調方式  
BPSK-DSSS方式  
GFSK方式
- (2) チャンネル帯域幅  
600kHz (BPSK-DSSSの場合)  
400kHz (GFSKの場合)
- (3) 伝送レート  
20kbps (BPSK-DSSSの場合)  
100kbps (GFSKの場合)

1 机上に並べた機器相互の接続に使うくらい狭い範囲の通信ネットワーク。IT用語辞典e-words (<http://e-words.jp/>) より抜粋。

2 Review Committee：十数人のメンバーで構成されWGからの審議結果が最終的に受理可能なものであるか否かを、また、妥当なものであったか否かを詳細に検討し、最上組織のBoard Member会議へ最終答申を行う組織。

(4) チャンネルプラン

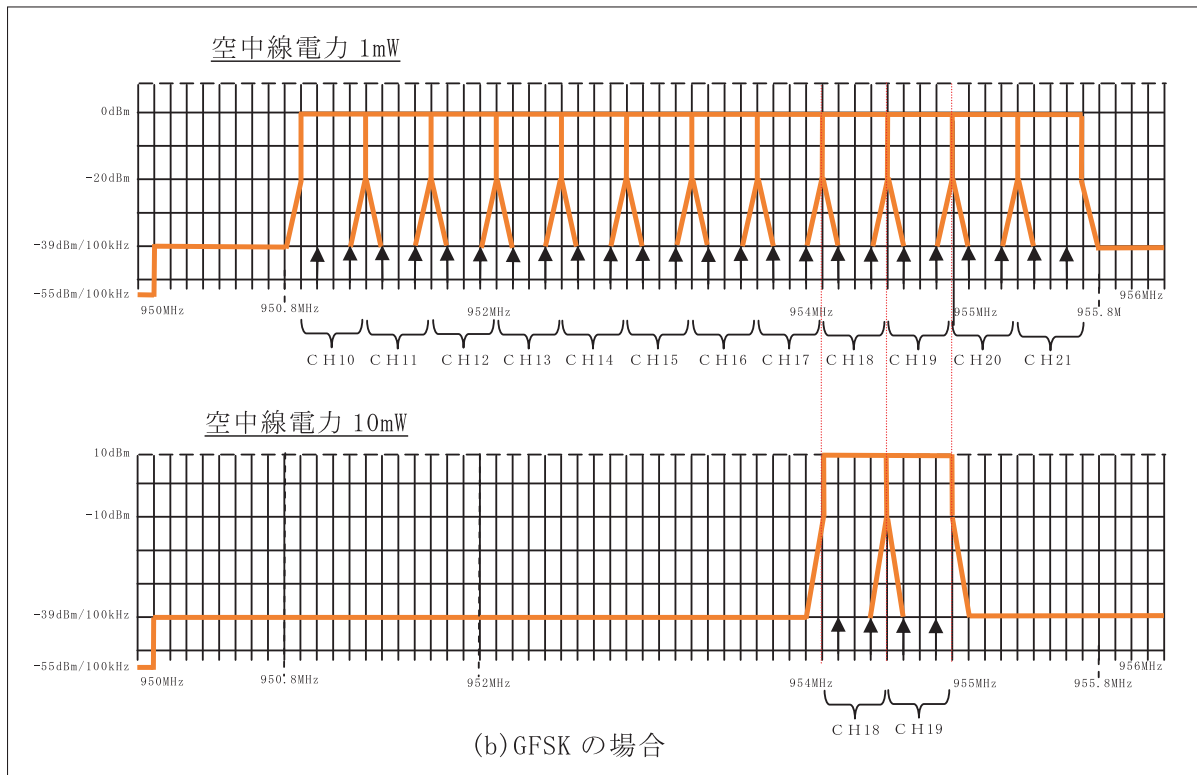
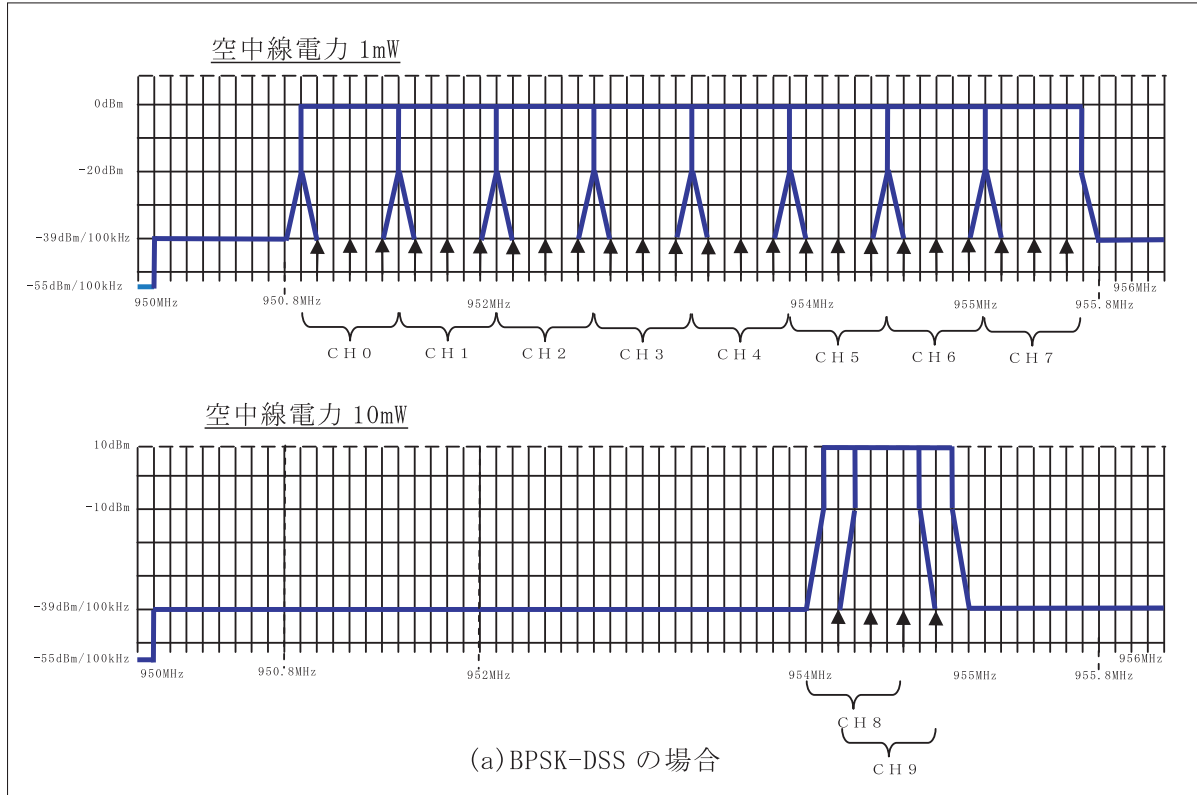


図 3 - 4 950MHz帯チャンネルプラン

## 第2節 アドホックネットワーク・マルチホップ通信とは

### 1 アドホックネットワークとマルチホップ

アドホックネットワークとは、提唱者である米国のRice大学のDavid B. Johnson氏によると「一時的で、固定的なインフラや集中管理機構がないネットワーク」と定義している。つまり、無線LANのようなアクセスポイントを必要としない、無線で接続できる端末（パソコン、PDA、携帯電話など）のみで構成されたネットワークであり、その通信経路は各端末の位置や信号の変化に応じて自動的に最適なものが随時構築され固定的ではない。また、「無線アドホックネットワーク」、「自立分散型無線ネットワーク」とも呼ばれている。

一方、マルチホップとは多数の端末をアクセスポイントの介在なしに相互に多段接続する形態を指し、アドホックネットワークでは基地局やアクセスポイントが不要となることから、通信基盤を持たない場所で安価にネットワークを構築することができる。ある限定域内での簡易なネットワーク構築の手段として極めて有効である。

アドホックネットワーク及びマルチホップ通信技術の双方を用いたネットワークとしてスター型、メッシュ型及びツリー型がある。（図3-5参照）これらは、それぞれ単独又は複数の組み合わせで構築される。各々のネットワークはコーディネータと呼ばれる他のデバイスが接続することを許可するFFD（Full Function Device：フル機能デバイス）、PANコーディネータと呼ばれるコーディネータの中で特にネットワークを管理する機能を持ったFFD、更に機能が限定されているサブ・デバイスにより構成される。

センサーネットワークは固定した端末によるネットワーク（非アドホック）で構築することもあるが、アドホックネットワーク・マルチホップで構成することにより応用の幅が飛躍的に広がる。

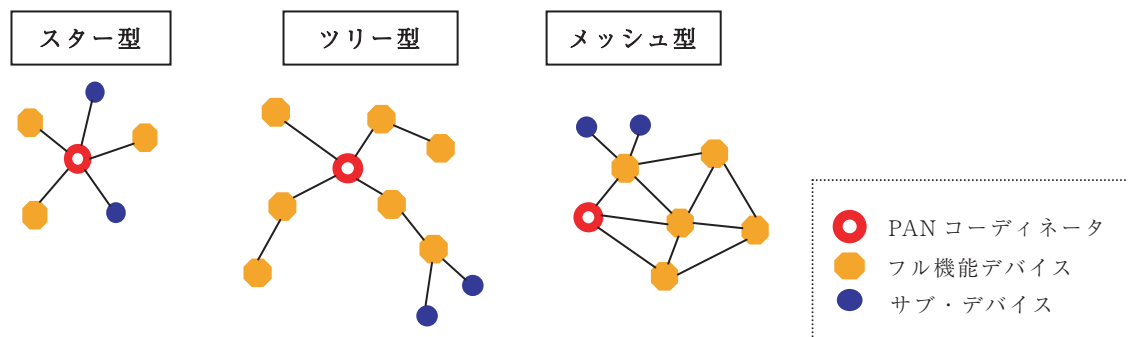


図3-5 ネットワークモデル



## 2 ZigBee (ジグビー)

アドホックネットワーク・マルチホップを構成するセンサーネットワークの代表的なものにZigBeeがある。その名称は蜂がジグザグに飛ぶ様に情報が伝達されることをイメージした造語で、技術的諸元はIEEE802.15.4で規格化されている。これは、短距離無線通信規格の一つで低速で転送距離が短い代わりに、安価で消費電力が少ないという特徴を持つ。そのデータの構造は、低層の通信を司る部分、中層のZigBee Alliance<sup>1</sup>で規定される部分、更にユーザーが利用する上層のアプリケーションの三つに分類される。なお、IEEE802.15.4は方式毎にIEEE802.15.4a、IEEE802.15.4b、…など更に細かく分類され標準化されている。ZigBeeのデータ転送速度は、2.4GHzでは250Kbps、主に米国向け仕様の902~928MHzでは40Kbps、欧州向けの仕様の868~870MHzでは20Kbpsである。日本国内で利用できる周波数帯は2.4GHz帯のISM<sup>2</sup>バンド（ISM: Industry- Science- Medical）だけであったが、平成20年5月に新たに950MHz帯の電波が割当された。この新たな電波を使用したZigBeeの標準化を検討するTGが第1節に記したIEEE802.15.4dである。

さて、国内でZigBee機器を使用するには、その電気的特性が電波法で定める特定無線設備としての技術基準に適合していることが条件であり、この基準に適合していることの証明を受ける必要がある。通常この手続きはメーカーが予め行っているため、機器を購入したユーザーが自ら手続きする必要はない。

ZigBee端末には自動中継機能があり、この機能により端末同士が通信を行える限り中継を繰り返し、遠方まで情報を伝達させることが可能となる。装置の動作時間は、送受信の頻度にもよるが乾電池で最大数年間稼働させることも可能である。

一つのZigBeeネットワークには最大で65,528個（アドレスで0x0000~0xFFFF7）の端末を接続することが出来るが、この数はアドレスの割当て可能な最大値から算出された数であり、実際のネットワークで実用的に使用できる端末数は通信頻度や端末配置の密度等に大きく依存し、また製品によっても大きく異なる。

1 ZigBeeの仕様を策定している関係業界等で構成する組織

2 産業科学医療用周波数帯であるが、実際にはより広い分野で使われている。

## 第3節 センサーの種類と応用例

### 1 センサーとは

#### (1) センサーの種類

センサーとは広義では外の状態を知るための知覚素子を意味するものであるが、特にネットワークに接続する場合は知覚素子で検知した情報を電気信号に変換して出力するプロセスまでを含む装置全体を指す。表3-4のとおり検知しようとする情報の種類に応じて様々なセンサーが開発されている。

#### (2) センサー技術の応用例

センサー素子で感知した情報は電気信号に変換されノードと呼ばれる無線端末に接続される。センサーが接続された複数のノードをネットワークに接続することで離れた複数の地点の情報を特定の場所で同時に得ることが可能となる。このことがネットワーク構築の最大の利点であり、センサーだけを単独で分散配置してもネットワークで繋がれていなければ各観測点に赴いてデータを収集しなければならない。今日センサーネットワークは表3-3のとおり様々な分野で応用されている。

表3-3 センサーネットワークの応用例

応用分野	使用されるセンサーの種類
セキュリティ・防災	温度/湿度/CO2/光/人感/煙など
産業分野	歪み/圧力/温度/加速度/赤外線/磁気/計測器機など
住宅・暮らし	人感/温度/湿度/煙/照度/体温など
環境・学術研究	各種ガス/位置(GPS)/光/計測器機/塵埃/各種化学物質など

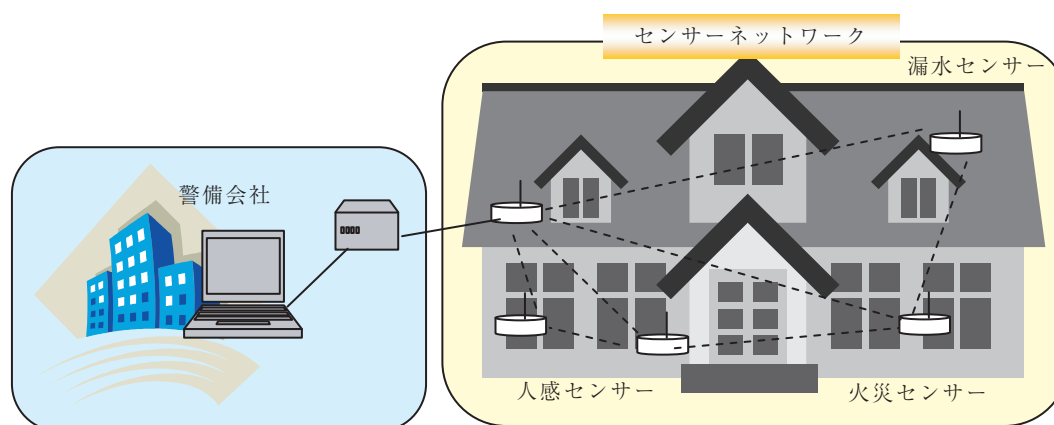


図3-6 センサーネットワークの一例（住宅セキュリティシステム）

表3-4 センサーの種類と原理

対 象	分 類	説 明
温 度	熱 電 対	2種の異なる金属または半導体の両端を接合し、両接点間の起電力を計測する。
	抵 抗 測 温 体	金属の抵抗率が温度に依存する特性を利用。
	サ ー ミ ス タ	半導体の抵抗率が温度に依存する特性を利用。
湿 度	電 気 式 湿 度 計	高分子フィルムの吸湿性を利用して、静電容量の変化を電気信号に変換する。
	通 風 型 乾 湿 計	2本のガラス製温度計で、布の端を水に浸した湿球と乾球の差、及び気温から水蒸気圧を計算して相対湿度を計測する。
	毛 髪 湿 度 計	毛髪が湿度の変化によって伸び縮みする性質を利用する。
水 分	水 分 感 知	2種の異なる金属または半導体の両端を接合し、両接点間の起電力を計測する。
熱 量	断 熱 熱 量 計	温度変化を測定する熱交換部分とそれを包囲する環境部分とを熱的に隔離し、 $熱量 = 熱容量 \times 温度変化量$ で計算する。
濃 度	密 度 計	密度は単位体積当たりの質量。気体、液体、固体の密度がある。
粘 度	粘 度 計	液体の粘度計測は、毛细管粘度計、落球粘度計、回転粘度計に分類される。
流 量	機 械 式	測定流体を羽根車に当てて、その回転数を流量に変換する羽根車式、鉛直方向に設置されたパイプ中の浮きの上昇度合いで流量を検出する浮き子式等がある。
	電 磁 式	ファラデーの法則(*1)を利用して流量を検出する。
圧 力	機 械 式	空気圧の変化等を機械的に利用して、針を伸縮し圧力を検出する。
	電 子 式	圧力によりステンレスやシリコンの隔離膜が歪む歪抵抗値の変化を圧力検出する。
加 速 度	MEMS型加速度	単位時間当たりの速度変化を半導体を用いて三軸で計測する。検知機構によりピエゾ(*2)抵抗型・静電容量型・熱検知型の3種類がある。
	動 電 式	導体が磁束を横切ると起電力を発生する原理(ファラデーの法則)を利用する。
	歪 み ゲ ー ジ 式	物体に加速度がかかると歪みを生ずることから、その歪み(電気抵抗変化)を計測する。
	圧 電 式	慣性力を受けると電荷を生じる圧電素子を利用して、発生電荷から加速度を計測する。
振 動	非 接 触 式	振動しない基準点と測定対象物の相対的振動を検出する。
	接 触 式	測定対象物にセンサーを固定して取り付ける。センサー内部はバネと重りからなり、重りの振動を検出する。
ひ ず み	歪 み ゲ ー ジ 式	物体に力を与えて電気抵抗の変化を計測。
光	光 起 電 力 効 果	光電効果(*3)により導体と半導体、または2つの半導体の接触面に現れる電圧を計測。(フォトダイオード、フォトトランジスタ)
	光 導 電 効 果	光エネルギーにより、物質内でキャリアが発生して変化する内部抵抗を計測する。
	赤外線センサー	赤外線を検知。
磁 気	ホ ー ル 素 子	微小電流を流した半導体に垂直に磁界が加わっているとき、電流と磁界の双方に垂直な方向へ電圧が発生するホール効果(*4)を利用する。
	磁 気 抵 抗 素 子	磁界の強さによって電気抵抗が変化する特殊な磁性体を利用する。
	S Q U I D 型	ジョセフソン効果(*5)と超伝導現象を利用。(高感度)
変位/位置	レ ー ザ 式 変 位	半導体レーザの光を測定対象物に照射し、対象物から拡散反射された光線を光位置検出素子で変位量を計測する。

	渦電流式変位	高周波磁界で磁界内に測定対象物があると、対象物表面に垂直方向の渦電流が流れて、センサーコイルのインピーダンスが変化することにより、距離を測定する。
	接触式変位	3つのコイルと可動鉄心で1次コイルに交流を流し被測定物体に連動して動く可動鉄心により2次コイルに誘起電圧が発生する。これを差動結合し、電圧差で変位を測定する。
	超音波式変位	超音波の反射を受信し、発信から受信までの時間を計測し距離を測定する。
	CCDレーザ方式	CCDを利用し、三角測距方式で光量により変位測定する。
回 転	ホールIC式	ホール素子を利用し、磁束密度に比例した出力から回転数を計測する。
	電磁ピックアップ式	永久磁石にコイルを巻き、ギヤが回ることによりコイルを通る磁力線変化が生じる。これを回転数に変換。

- (\*1) ファラデーの法則：一つの回路に生じる誘導起電力の大きさはその回路を貫く磁界の変化の割合に比例するというもの。
- (\*2) ピエゾ効果：圧電効果ともいう。ある物質に圧力（力）を加えると、圧力に比例した分極（表面電荷）が現れる現象をいう。また、逆に電界を印加すると圧電体自体が変形する現象は逆圧電効果とも言われるが、この現象も含めて圧電効果と呼ぶ場合もある。
- (\*3) 光電効果：物質に光が当たると中の電子が飛び出てくる現象をいう。一般に物質中の電子は原子核の引力で束縛されており普通は外へ出てこられない。外へ出るためには、束縛を切るためのエネルギーが必要であり、光電効果では、光のエネルギーがこの束縛から開放する。
- (\*4) ホール効果：電流の流れているものに対し、電流に垂直に磁場をかけると、電流と磁場の両方に直交する方向に起電力が現れる現象をいう。主に半導体素子で応用される。
- (\*5) ジョセフソン効果：極めて薄い絶縁層を挟んで弱く結合した2つの超電導体間に生じる現象である。超電導接合（ジョセフソン接合）された2つの超電導体間の電子の位相差 $\theta$ に応じた超電導電流（ジョセフソン電流）が、超電導電子のトンネル効果（\*6）により絶縁層を通して流れる。
- (\*6) トンネル効果：非常に微細な世界にある粒子が、古典的には乗り越えることができないポテンシャル（エネルギー）障壁を、量子効果すなわち、時間とエネルギーとの不確定性原理により乗り越えてしまう（透過してしまう）現象。

本章では、有識者、地方公共団体、情報通信関係メーカーなどを通じて山間部における分野別のセンシングニーズを取りまとめた結果及びこのセンシングニーズに有効なセンサーネットワークシステムについての検討結果を、表4-1に示す。

表4-1 分野別のセンシングニーズ及び有効なセンサーネットワークシステム

分野	分野別のセンシングニーズ	有効なセンサーネットワークシステム
野生動物の生態観測及び鳥獣被害対策分野	クマやニホンジカによる人身被害対策、農作物被害対策、線路内進入対策	鳥獣被害対策システム (P26参照)
	クマやニホンジカの行動・生態調査	鳥獣生態調査システム (P27参照)
災害対策・安全安心な生活情報提供分野 森林・林業分野	線路内への落石・土砂崩落・倒木による列車の安全運行対策	線路内落石等対策システム (P28参照)
	山間部の雪害、地滑り、土砂崩落、林野火災、地震等の被害対策（兆候による早期発見、二次災害の防止等）	山間部災害対策システム (P29参照)
	道路・橋などの構造物監視による車両等の安全運行対策（コンクリート、鉄筋等のひび割れ発生、進展検知による車両の安全運行対策）	道路等構造物監視システム (P30参照)
	林業従事者や登山者等の入下山管理、労働災害対策、健康管理	入山者管理システム (P31参照)

## 1 鳥獣被害対策システム

### (1) システムの概要

鳥獣被害を事前に防止することを目的として、人里に接近しようとする鳥獣を検知し、周辺住民にアラームを通知するとともに、サイレンを鳴らすなどして鳥獣を威嚇する。

### (2) システムのイメージ

図4-1に示す。

### (3) システムの構成及び動作

#### ア 鳥獣センサーノード

- ・赤外線センサーなどを鳥獣の通り道に設置し、鳥獣の接近を検知する。
- ・検知したら、サーバへ送信する。

#### イ サーバ

- ・携帯電話のサービスエリア内に設置され、鳥獣の接近をサイレンや携帯電話などを使って近隣の住民へ通知する。
- ・鳥獣威嚇のコマンドを送信する。

#### ウ 鳥獣威嚇

- ・光（ライト、フラッシュ）、サイレンなどで鳥獣を威嚇する。

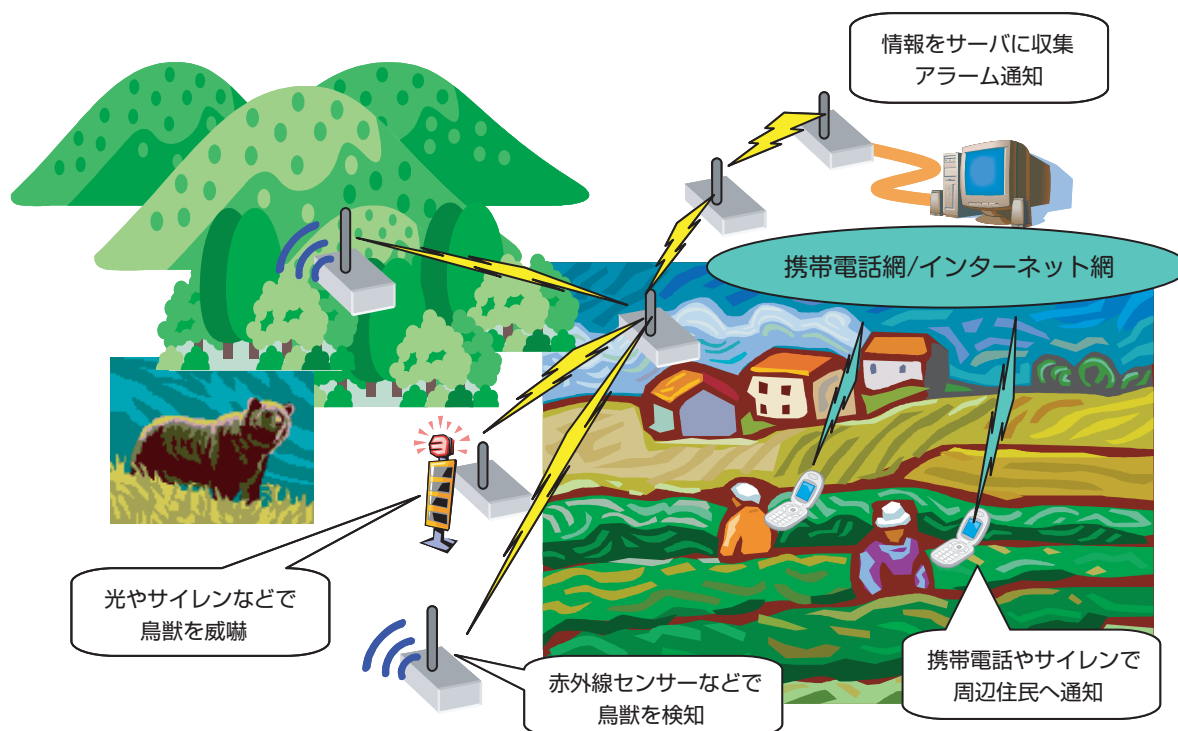


図4-1 鳥獣被害対策システムのイメージ



## 2 鳥獣生態調査システム

### (1) システムの概要

鳥獣保護や鳥獣被害防止などを目的として、一度捕獲してリリースした鳥獣を対象にその位置や体温などの情報を検知し、関係者に通報する。

### (2) システムのイメージ

図4-2に示す。

### (3) システムの構成及び動作

#### ア 鳥獣センサーノード

- ・GPSセンサー、温度センサーなどを搭載

位置推定方法は、通常時はGPSで位置を確定、山陰や穴の中などGPSを使用できない場合はRSSI値（受信電波強度）による位置推定で補間する。

- ・通常時はスリープし、定期的に起動してセンサーデータを発信

#### イ 山間部に設置したセンサーノード

- ・鳥獣センサーから受信した情報とRSSI値を、マルチホップ通信でサーバに送信する。

#### ウ サーバ

- ・携帯電話のサービスエリア内に設置され、センサーからの検知情報を携帯電話網やインターネット網を通じて遠隔にいる管理機関や関係者にメールにより通報する。



図4-2 鳥獣生態調査システムのイメージ

### 3 線路内落石等対策システム

(1) システムの概要

列車の安全運行を目的として、線路内への落石などをセンサーで検知し、指令などを通じて駅員や車両運転手などの関係者に通報する。

(2) システムのイメージ

図4-3に示す。

(3) システムの構成及び動作

ア 落石検知センサーノード

センサーが検知した落石などの情報を送信する。

イ サーバ

センサーからの検知情報を業務用無線などを通じて駅や運転手などの関係者に通報する。

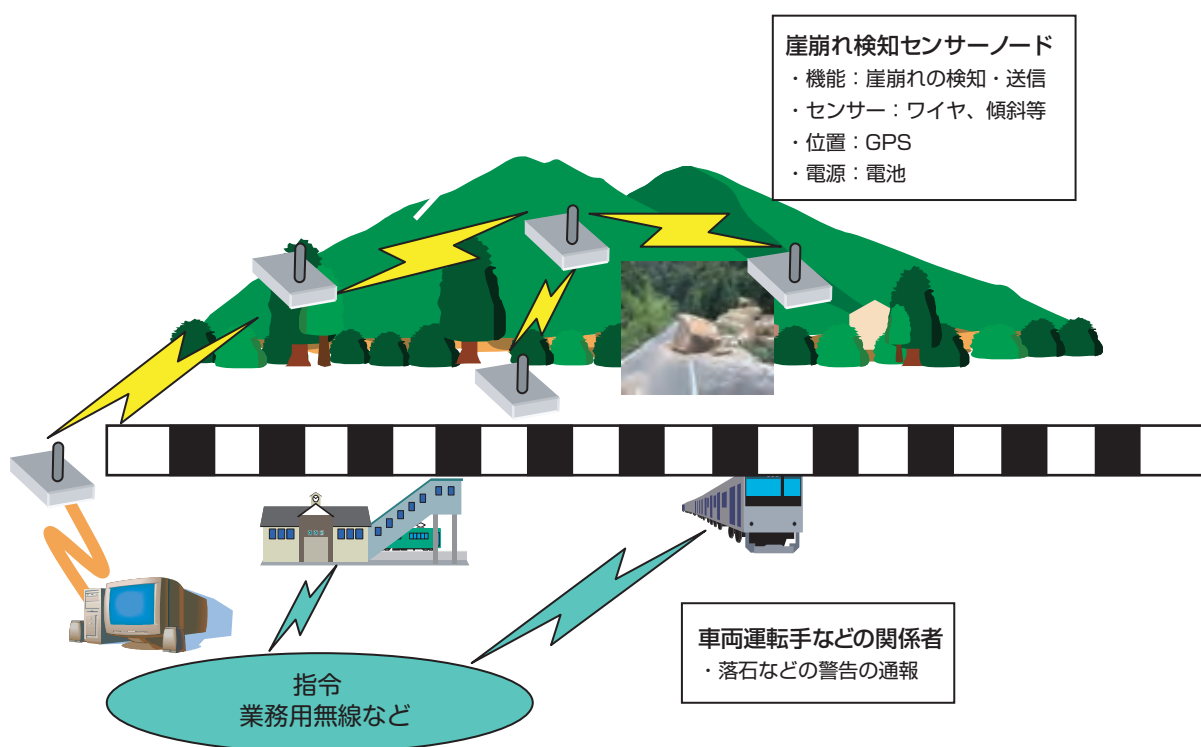


図4-3 線路内落石対策システムのイメージ

## 4 山間部災害対策システム

### (1) システムの概要

山間部における地滑り、土石流、崖崩れ、落石などからの災害対策を目的として、これらの災害情報を検知し、関係者に通報する。

### (2) システムのイメージ

図4-4に示す。

### (3) システムの構成及び動作

#### ア 傾斜検知センサーノード

センサーが検知した地滑りなどの災害情報を送信する。

#### イ サーバ

携帯電話のサービスエリア内に設置され、センサーからの検知情報を携帯電話網やインターネット網を通じて遠隔にいる管理機関や関係者にメールにより通報する。

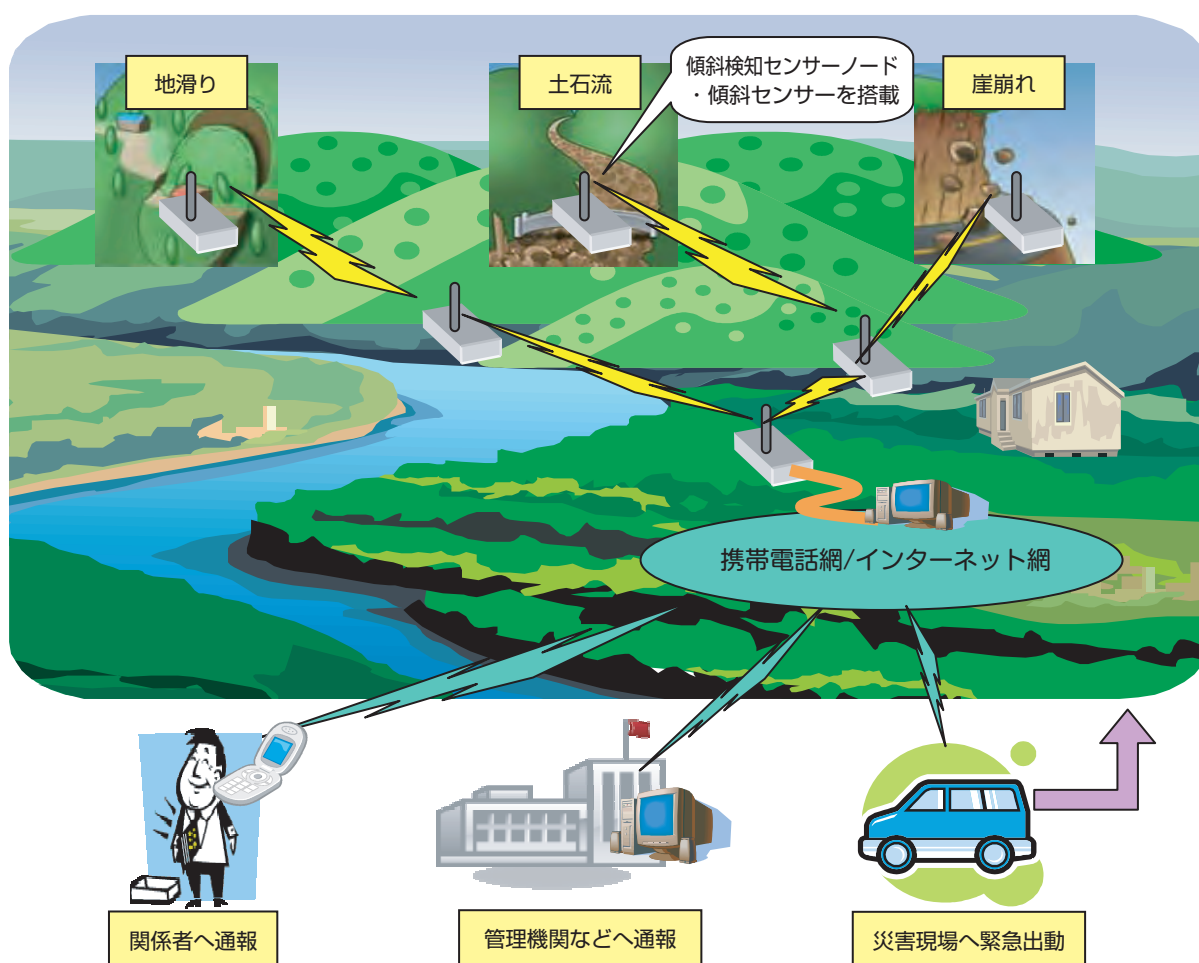


図4-4 山間部災害対策システムのイメージ

## 5 道路等構造物監視システム

### (1) システムの概要

車両の安全運行を目的として、道路、橋など構造物のコンクリートひび割れの進展を検知し、関係者に通報する。

### (2) システムのイメージ

図4-5に示す。

### (3) システムの構成及び動作

#### ア 亀裂変位計センサーノード

センサーが検知したコンクリートのひび割れを送信する。

#### イ サーバ

携帯電話のサービスエリア内に設置され、センサーからの検知情報を携帯電話網やインターネット網を通じて専用サーバに設定時間毎に自動送信するとともに、管理機関や関係者に通報する。

亀裂の進行具合により、警報メールを関係者へ送信することが可能である。

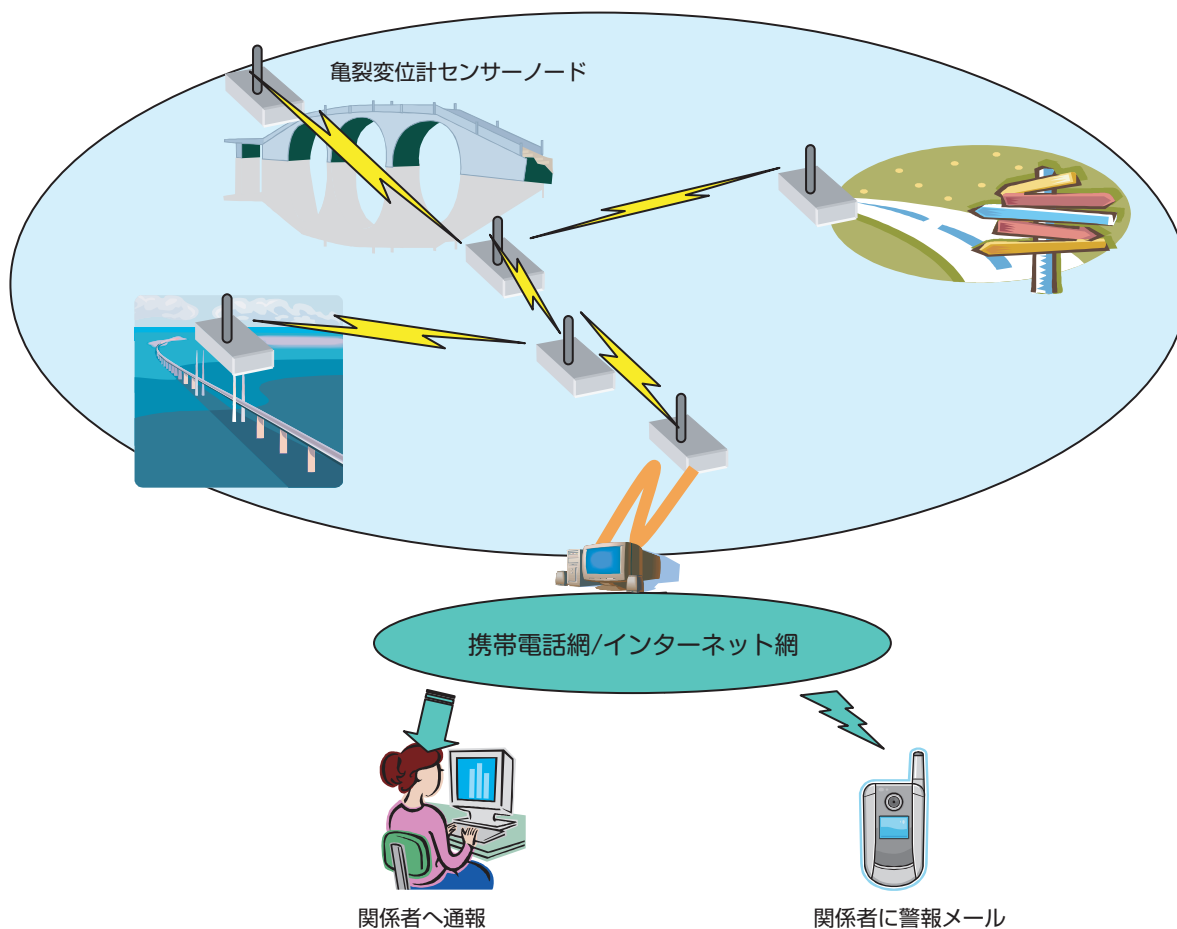


図4-5 道路等構造物監視システムのイメージ



## 第1節 試験の概要

本フィールド試験は、山間部においてセンサーネットワークシステムを構築しようとする場合に必要となる基礎的な電波伝搬特性を求めることが目的である。具体的には、平成20年5月から小電力アクティブ系無線システム用として新たに使用できるようになった950MHz帯の電波伝搬特性を、従来からセンサーネットワーク用として利用可能であった2.4GHz帯と比較して評価するものである。

本フィールド試験では、山間部特有の地理的及び環境条件並びに山間部での利用を勘案し、次の条件下で試験を行う。

## 1 試験項目と目的

## (1) 見通し外での伝搬特性

山間部特有の地理的条件を考慮し、1対のセンサーノード間の電波伝搬特性を比較的平坦な樹林及び山陰（丘）により見通し外となる条件で測定し、平坦平地の見通し範囲内の伝搬特性と比較する。

## (2) 雪による影響

積雪の無い状態と積雪の有る状態で行い、電波の雪面反射が伝搬特性に与える影響を調べる。また、雪による電波の遮蔽特性についても調べる。

## (3) 動物等、移動体にノード（センサー）を着装した場合

動物体の陰になった場合の影響や、センサーノードが木や土にある巣穴に入った場合の損失等を調べる。

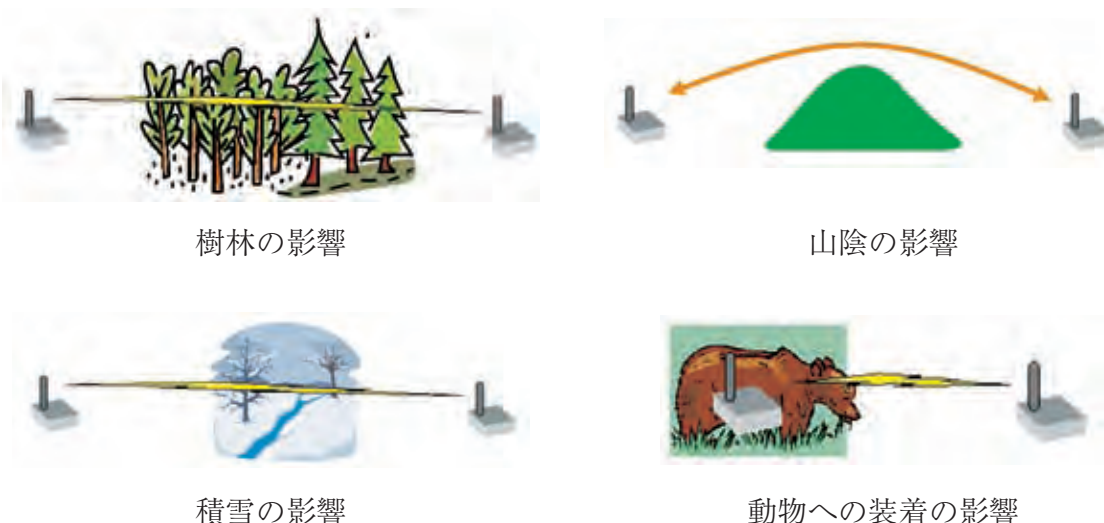


図5-1 フィールド試験の測定条件



## 2 試験日および試験場所

上述の特性を調べるために、以下の3回のフィールド試験を実施した。

(1) 平地における見通し内の伝搬特性試験

測定日 平成20年11月6日(木)

場所 荒川河川敷運動公園(埼玉県川口市)

試験内容 平地における見通し内試験

(2) 森林における見通し外の伝搬特性試験

測定日 平成20年12月8日(月)～10日(水)

場所 岩手大学農学部附属滝沢演習林(岩手県岩手郡滝沢村)

試験内容 樹林の影響

山陰の影響

動物体による電波の遮蔽状況

巣穴による電波の遮蔽状況

(3) 森林における積雪時の伝搬特性試験

測定日 平成21年1月29日(木)～30日(金)

場所 岩手大学農学部附属滝沢演習林(岩手県岩手郡滝沢村)

試験内容 積雪時の影響

雪による電波の遮蔽状況

### 岩手大学農学部附属滝沢演習林の概要

演習林の96%が学術研究林に指定されており、アカマツ林の生態や天然更新、アカマツ系統別の遺伝的特性などアカマツに関する多方面からの研究が古くから行われている。また、広葉樹を含む多様な樹種の人工林の密度管理技術に関する研究も実践している。都市近郊林の特徴を活かし、鳥類や大型ほ乳類の生態・管理に関する研究にも実績があり、学生実習、学部学生の論文、他大学等各種研究機関にも盛んに利用されている



管理棟



新緑の演習林



### 3 使用機材等

3回のフィールド試験に使用したセンサーノードの概要は、表5-1及び写真5-1のとおりである。

表5-1 測定に使用した装置の仕様

	950MHz帯	2.4GHz帯
使用ノード	950MHz測定用ノード (OKI製)	2.4GHz測定用ノード (OKI製)
周波数	950~956MHz	2400~2483.5MHz
空中線電力	1mW (= 0 dBm)	1mW (= 0 dBm)
空中線利得	0 dBi ( $\lambda/4$ ホイップアンテナ)	2.14dBi ( $\lambda/2$ ダイポールアンテナ)
受信感度	-93dBm	-93dBm
変調方式	FSK方式	O-QPSK方式
伝送レート	90kbps	250kbps
信号の帯域幅	200kHz	2 MHz



送信ノード (左が950MHz帯、右が2.4GHz帯、外側は防水用の箱)



受信ノード (右が950MHz帯、左が2.4GHz帯)

写真5-1 測定に使用した無線ノードの外観

## 第2節 試験結果

### 1 測定方法及び測定条件

3回のフィールド試験に共通の測定方法及び測定条件は、以下のとおりである。

#### (1) 測定方法

950MHz帯と2.4GHz帯でそれぞれ1対2個のノードを用いて、送信ノードの場所を変えながら、固定した受信ノードで連続1000パケットを受信する。受信ノードに接続したノートPCでログを記録し、受信電波強度とパケットロス率を測定する。

#### (2) 測定距離

1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256mを基本とし、電波の到達状況等必要に応じてこれ以外の距離においても適宜測定を行う。

#### (3) アンテナ

水平面内無指向性となるようアンテナを地面に垂直な方向に立てる。アンテナ高は以下の通り。

- 受信センサーノード 2 m固定
- 送信センサーノード 2、0.5、0 mの3通り  
(荒川河川敷の測定では2 mと0.5 mのみ)

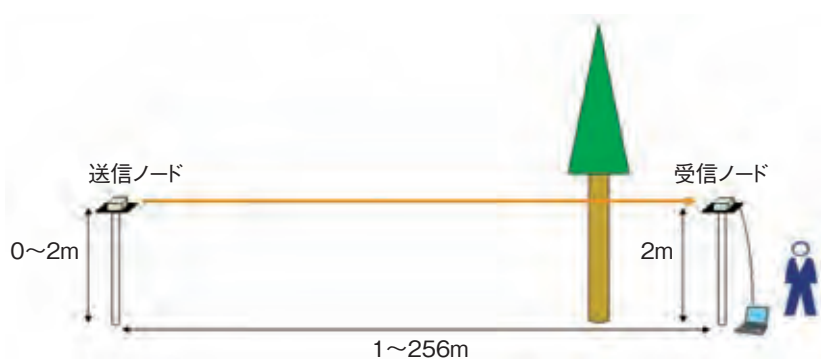
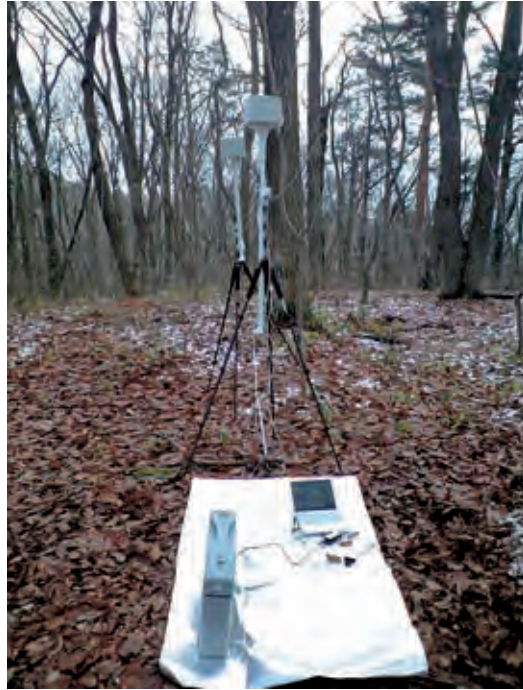


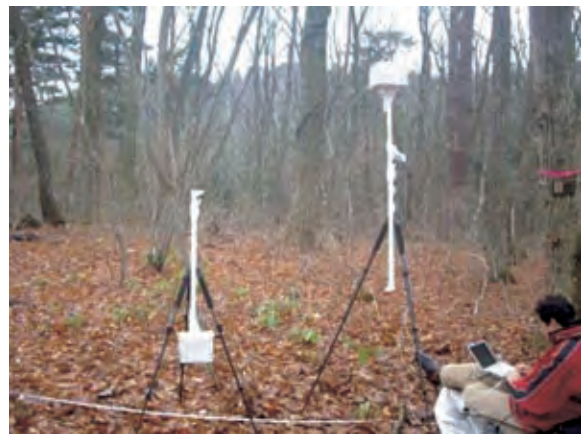
図5-2 測定システム構成図



アンテナ高 2 m のときの外観  
(三脚上に測定用ノードを防水箱に入れて設置。手前はノート P C とポータブル電源)



アンテナ高 0 m のときの外観



アンテナ高 0.5 m のときの外観

写真 5 - 2 送信センサーノードの設置状況

## 2 見通しの利く平坦平地における電波伝搬試験

### (1) 測定目的

平坦地の見通しの利く条件で予め電波伝搬状況を調査しておくことにより、山間部における様々な条件下で測定したデータとの比較が可能となる。

### (2) 測定場所

荒川河川敷の測定場所の地図を図5-3に示す。青丸印が固定受信ノードの設置場所であり、赤色矢印方向に送信ノードを移動させて測定した。

また固定受信ノード設置場所から見た荒川河川敷の景色を写真5-3に示す。固定受信ノードの設置場所から100m付近に野球グラウンドのフェンスなどが存在するが、ほぼ測定直線内は見通し空間である。また、右手の土手からは十分離れており、影響は無いと考える。



図5-3 荒川における測定場所を示す地図

固定受信ノード

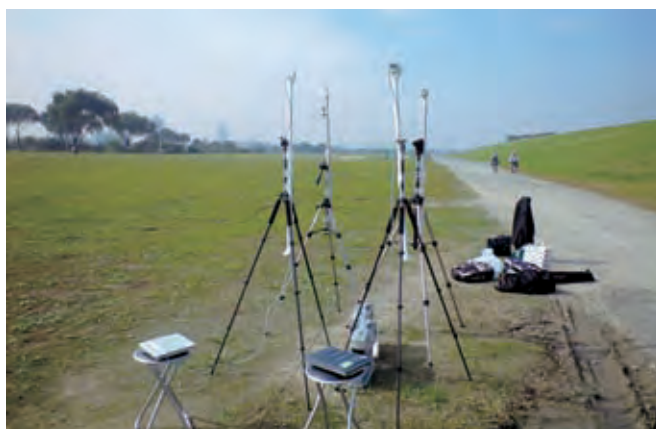


写真5-3 荒川河川敷の測定風景

### (3) 測定結果

荒川河川敷での測定結果を以下に示す。

#### ア 送信センサーノードアンテナ高 2 m の場合

送信センサーノードのアンテナ高を 2 m に設置した場合の、送信センサーノードと受信センサーノード間の距離に対する受信電波強度 (RSSI) の測定結果を 5 - 4 に示す。

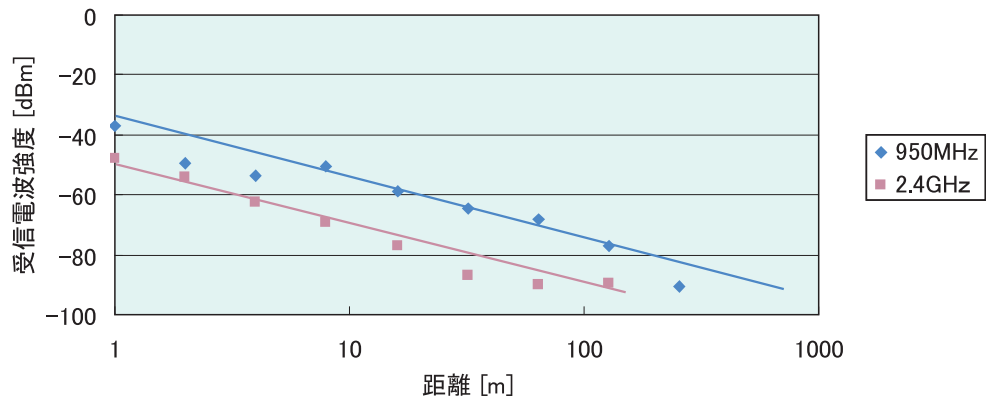


図 5 - 4 送信センサーノードアンテナ高 2 m のときの受信電波強度

横軸は対数表示しており、パケットロス率が20%以下の実測値をプロットした。なお、測定に用いたアンテナの利得差が2.14dBmあるため、その差を補完するために、950MHzの結果に4.28dBmを加算して、 $\lambda/2$  ダイポールアンテナ相当の値に補正した。また、自由空間における受信電力は距離の $-2$ 乗に比例して減衰していくため、傾きを $-2$ 乗に固定した近似直線を引いている。

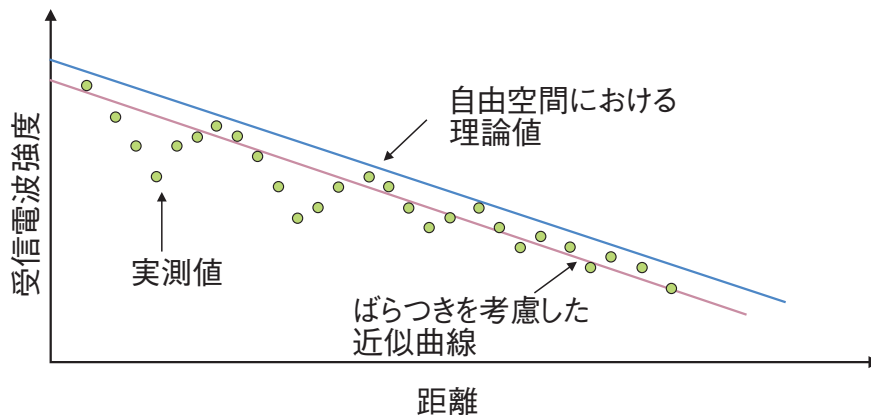


図 5 - 5 自由空間における値と実測値との関係



なお、図5-5に示すように、地上による実測値は直接波と大地で反射された電波の合成であるため、場所によりその位相関係が変化し振動を繰り返しながら自由空間での値に収束する。したがって、実測値をプロットする場合はこのことを考慮した上で近似直線を描いて構わない。

自由空間における伝搬損失<sup>1</sup>は

$$L_t = 10 \log (4 \pi d / \lambda)^2 - G_t - G_r$$

$L_t$  : 送信アンテナ給電端から受信アンテナ給電端までの全損失 (dB)

$d$  : 距離 (m)

$\lambda$  : 波長 (m)

$G_t, G_r$  : 送受信アンテナの利得 (dB)

で表されるが、図5-5の場合は、この理論値に対して、数dBの固定損が発生しているとみなされる。本試験の結果は図5-4のとおりであるが、電力値は理論値に対して、約10dB低いことになる。近似直線が正確に求められたと仮定すれば、近似線を伸ばすことで電波の到達距離を推測することができる。図5-4において、-100dBmの受信感度を実現できたとすると、950MHzは約1km、2.4GHzでも約300mの到達距離が実現できると読み取れる。

送信センサーノードのアンテナ高が2mのときのパケットロス率を図5-6に示す。パケットロス率は受信電力が受信感度よりも数dBさえ大きければほとんど発生せず、受信電力が受信感度と接近した時点で急激に大きくなる。

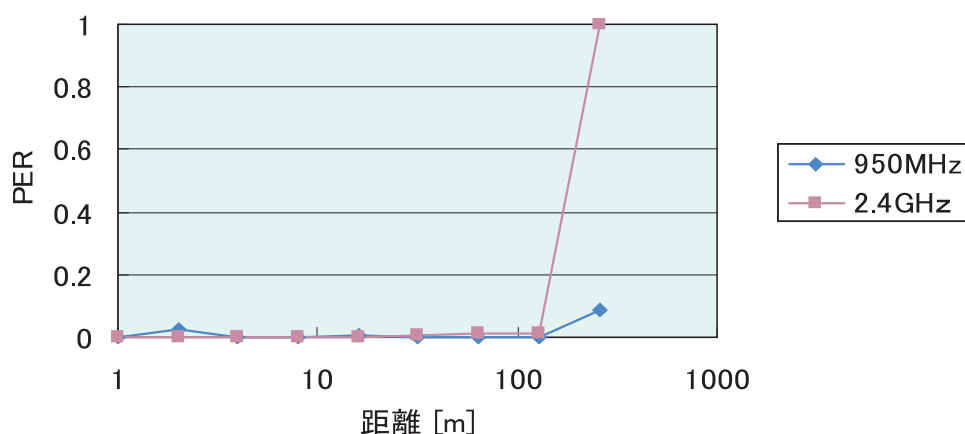


図5-6 送信センサーノードアンテナ高2mのときのパケットロス率

<sup>1</sup> 参考文献：奥村、進士監修，“移動通信の基礎”，電子通信学会（1986）。

イ 送信センサーノードアンテナ高0.5mの場合

送信センサーノードのアンテナ高を0.5mに設定した場合の受信電波強度を図5-7に示す。比較のため、送信センサーノードアンテナ高が2mのときの近似直線を破線で示す。

アンテナ高を低くすることで、フレネルゾーン（フレネルゾーンについては第3節を参照）に入る地面の割合が増えるため、受信電波の強度は低下する。フレネルゾーンの半径は周波数が低くなるほど大きくなるため、950MHzの減衰量は2.4GHzに比較してやや大きい。

また、水平距離が4m以下の場所、伝搬路長に比して送信センサーノードと受信センサーノードの高低差が大きいため、送信センサーノードから見た受信センサーノードの位置は水平方向ではなく斜め下方の位置となる。本試験で使用したセンサーノードのアンテナは、アンテナの軸方方向、（アンテナを地面に対して垂直にした場合は鉛直方向）に対する輻射（受信アンテナの場合は感度）が最も少ない型ものを使用しているため、この方向に対するアンテナの感度は良くない。この理由により、距離が極端に近くなっても電波の強さはあまり大きくないものとする。そこで、近似線は4m以下の測定値を無視して引いている。

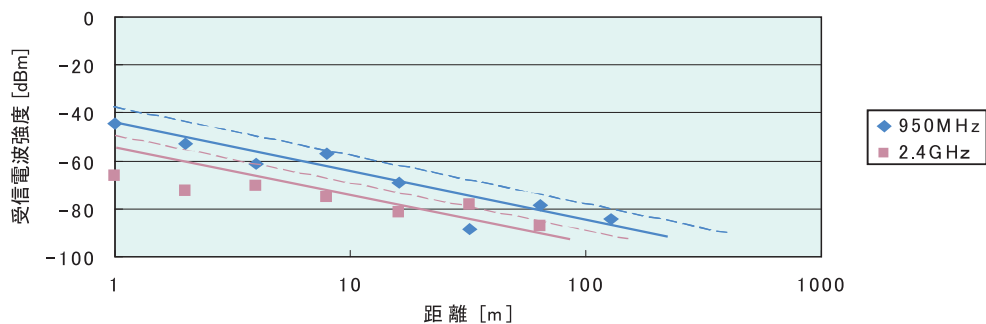


図5-7 送信センサーノードアンテナ高0.5mのときの受信電波強度

送信センサーノードアンテナ高が0.5mのときのパケットロス率を図5-8に示す。

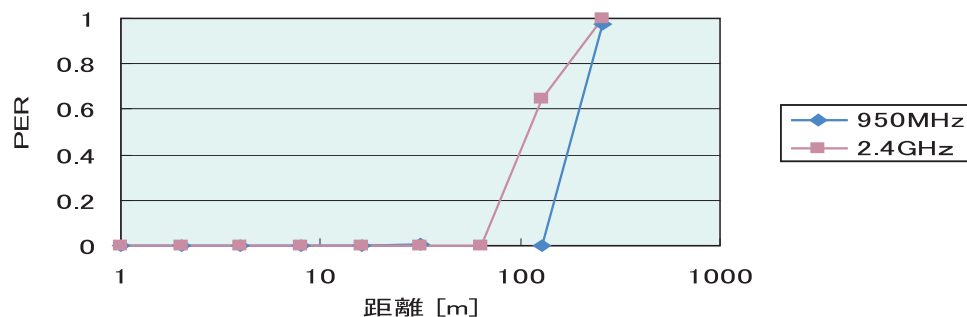


図5-8 送信センサーノードアンテナ高0.5mのときのパケットロス率



### 3 樹木の影響を調べるための電波伝搬試験

#### (1) 測定場所

岩手大学農学部附属滝沢演習林を、本フィールド試験場所として提供して頂いた。同演習林は里山の典型である広葉樹林だけでなく、針葉樹林も混在する森林であり、数十年間伐採を行っていない不伐の森のエリアもある。管理棟近くの広葉樹林を中心に「山下り」「平地」「丘越え」の3つのコースを設定し、測定を行った。

測定場所の地図を図5-9に示す。青丸印の固定受信ノードから赤色矢印方向に送信ノードを移動させて測定した。

固定受信ノード設置場所付近から見た各コースの景色と斜面の状態を写真5-4(a)~(c)に示す。写真から分かるように、広葉樹はすべて葉が落ちており電波を遮蔽するものは幹と枝だけである。

「山下り」コースは、小高い丘の頂上から、緩やかに下るコースである。32mまでは斜面が平坦であり見通し可能であるが、32mを過ぎた辺りから斜面が急になり、見通しが取れなくなる。

「山下り」コースで64m以降の見通しが取れなかったため、高低差の少ない別の地点に「平地」コースを設定して、64m以降の測定を行った。このコースでは約1mの高さで笹が地面を覆っており、完全な見通しではない。

「丘越え」コースは、小高い丘の頂上手前16m地点に固定した受信センサーノードを設置し、頂上を通過して、さらに下っていくコースである。固定した受信センサーノードの地点と頂上地点では約3mの高低差がある。また、頂上から90m付近までは5m程度の下りであり、その先はさらに急な下り坂となっている。

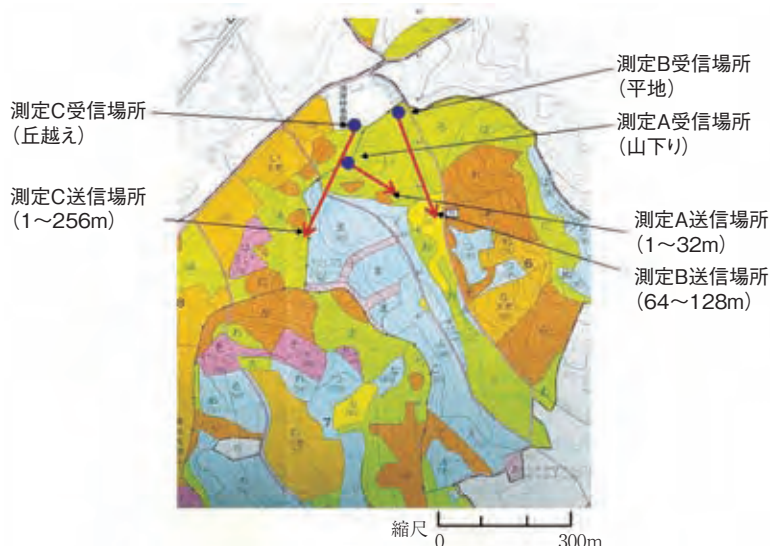
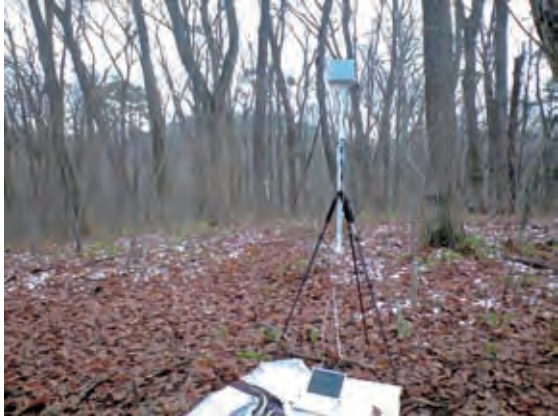
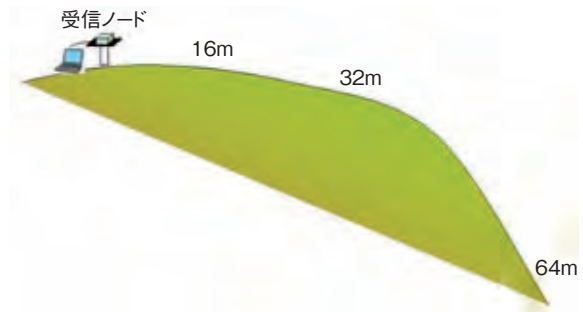


図5-9 岩手大学農学部附属滝沢演習林の地図



(a) 山下りコース



(b) 平地コース



(c) 丘越えコース

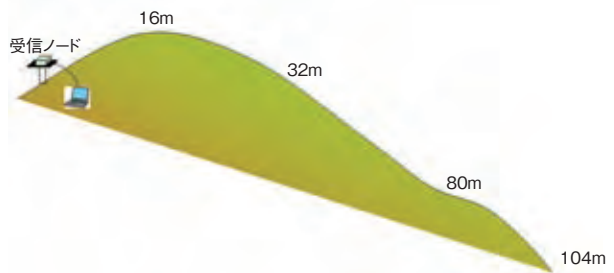


写真5-4 測定コースの景色と傾斜の状況

## (2) 測定結果

岩手大学農学部附属滝沢演習林での測定結果を以下に示す。

### ア 「山下り」「平地」コース：送信センサーノードアンテナ高2mの場合

送信センサーノードのアンテナ高を2mに設置した場合の、受信電波強度の測定結果を図5-10に示す。距離64mまでは山下りコースの結果を、距離64m以降は平地コースの結果を重ねて示している。比較のため、平坦平地（荒川河川敷）でのセンサーノードアンテナ高2mの近似直線を破線で示す。

図5-10から平坦平地での結果と山下りコースの結果は、距離10mまではほぼ同じであることがわかる。距離が近い場合、送信センサーノードと受信センサーノードの間の樹木の数少なく、遮蔽の影響が現れていないことを示している。32m以降になると樹林の影響を受け、電波強度が大きく下がっている。これにより送信センサーノード高2m、受信センサーノード高2mの場合950MHz帯の電波の樹木による減衰は約10dBであることが分かる。一方、2.4GHz帯の電波は樹木による影響はほとんど無いという結果が得られた。

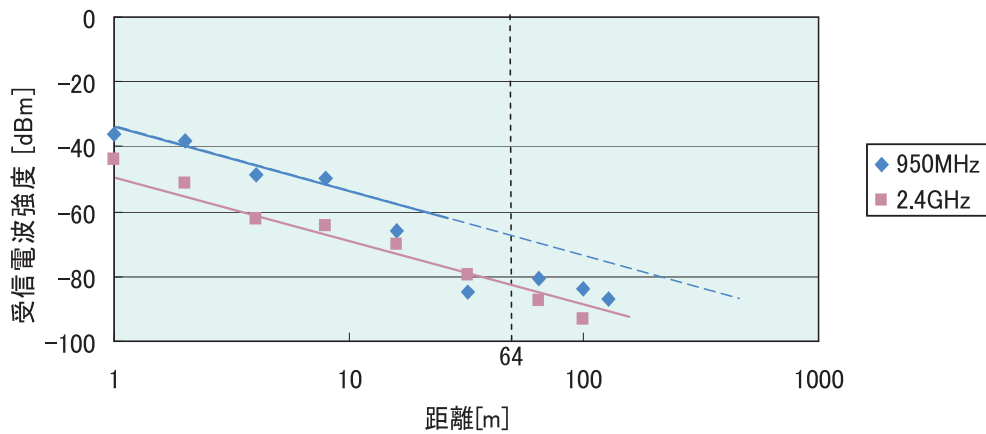


図5-10 山下り～平地コース、送信センサーノードアンテナ高2mのときの受信電波強度

送信センサーノードのアンテナ高が2mの時のパケットロス率を図5-11に示す。2.4GHz帯では100m付近でロス率が大きく変動しているが、これは受信レベルが丁度スレッシュホールドレベル付近になっているためと考えられる。

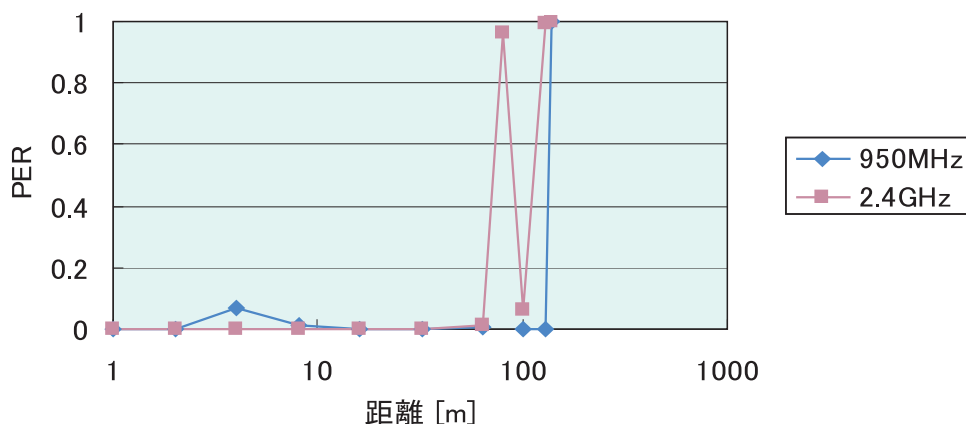


図5-11 山下り～平地コース、送信センサーノードアンテナ高2mの時のパケットロス率

イ 「山下り」コース：送信センサーノードアンテナ高0.5mの場合

送信センサーノードのアンテナ高を0.5mに設置した場合の、山下りコースの受信電波強度の測定結果を図5-12に示す。比較のため、平坦平地での送信センサーノードアンテナ高0.5mの近似直線を破線で示す。

図5-12から、950MHz帯、2.4GHz帯双方とも平坦平地のときよりも減衰していることがわかる。減衰量は950MHz帯で5～10dB、2.4GHz帯で数dB程度と思われる。送信センサーノードアンテナ高2mの場合と比較して、高さ0.5mの方が受信電力の低下が大きいようだ。

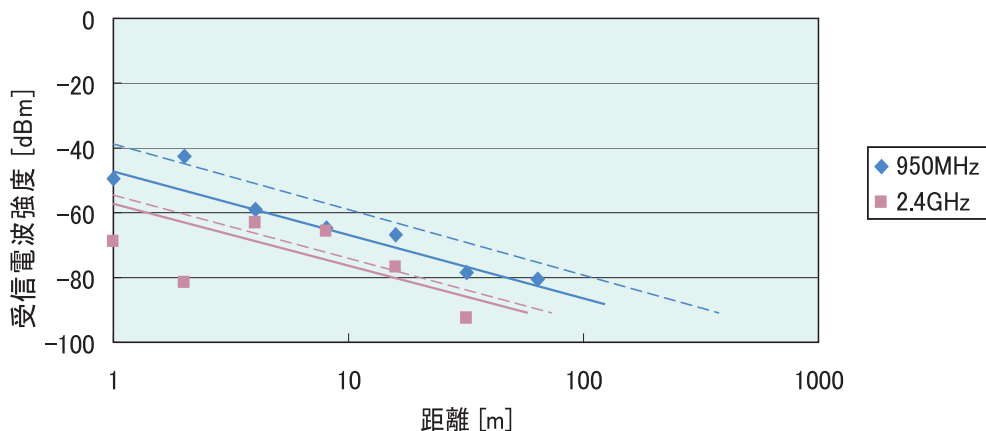


図5-12 山下りコース、送信センサーノードアンテナ高0.5mのときの受信電波強度

送信センサーノードのアンテナ高が0.5mの時のパケットロス率を図5-13に示す。

2.4GHz帯は距離64mを越えたところから急激にパケットロス率が高くなるが、950MHz帯ではそのような傾向がない。

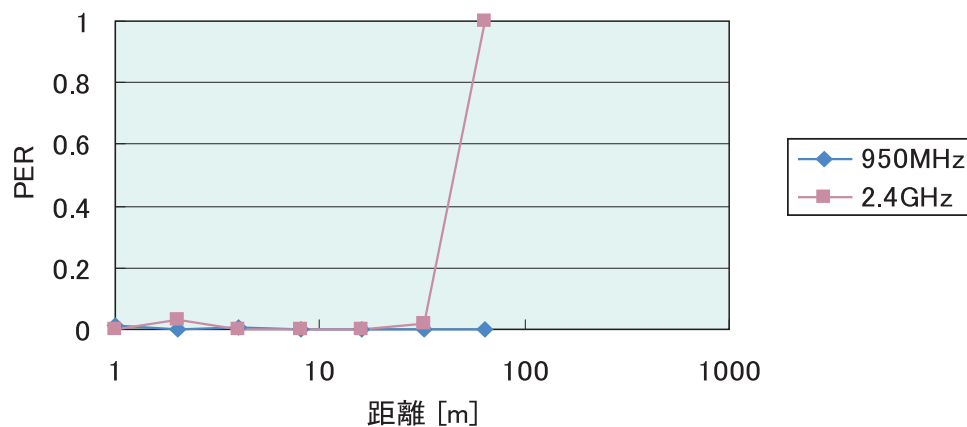


図5-13 山下りコース、送信センサーノードアンテナ高0.5mの時のパケットロス率

ウ 「山下り」コース：送信センサーノードアンテナ高0mの場合

送信センサーノードのアンテナ高を0mに設置した場合の、山下りコースの受信電波強度の測定結果を図5-14に示す。

図5-14より、950MHz帯では距離16m以降、2.4GHz帯では32m以降から近似直線から下方に大きくずれていることが分かる。計算によると950MHzでは伝搬路長が12.5m、2.4GHzでは32mを越えるとフレネルゾーンが地面に接する部分ができることから、この減衰の原因は地面がフレネルゾーンに入ってしまった結果と考える。

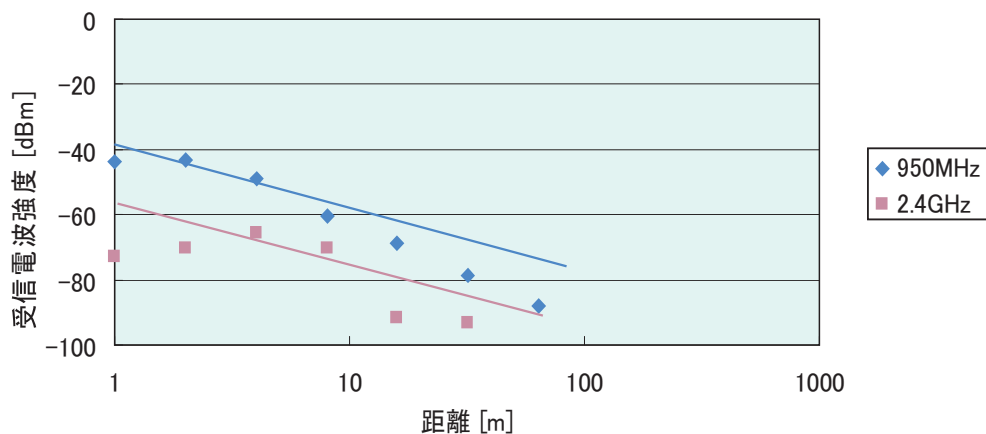


図5-14 山下りコース、送信センサーノードアンテナ高0mのときの受信電波強度

送信センサーノードアンテナ高が0mの時のパケットロス率を図5-15に示す。  
2.4GHz帯では、16mを越えた付近からパケットロス率が上がり始めているが、  
950MHz帯では80mまでほとんどパケットロスが無い。

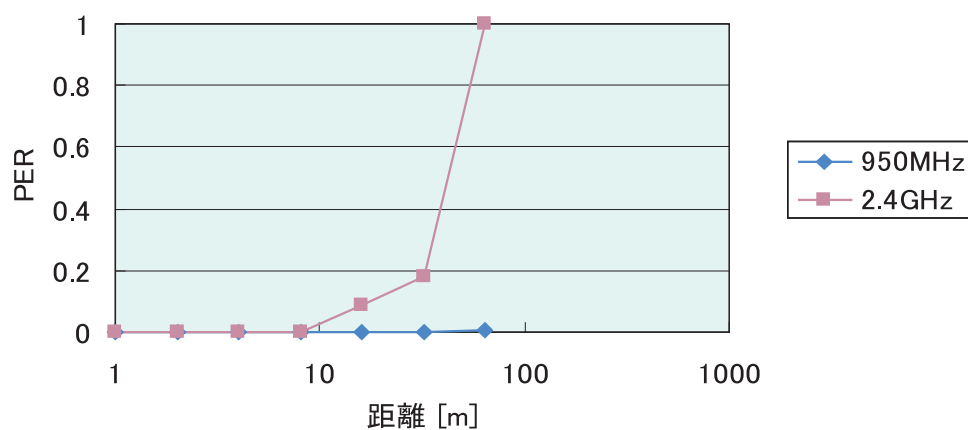


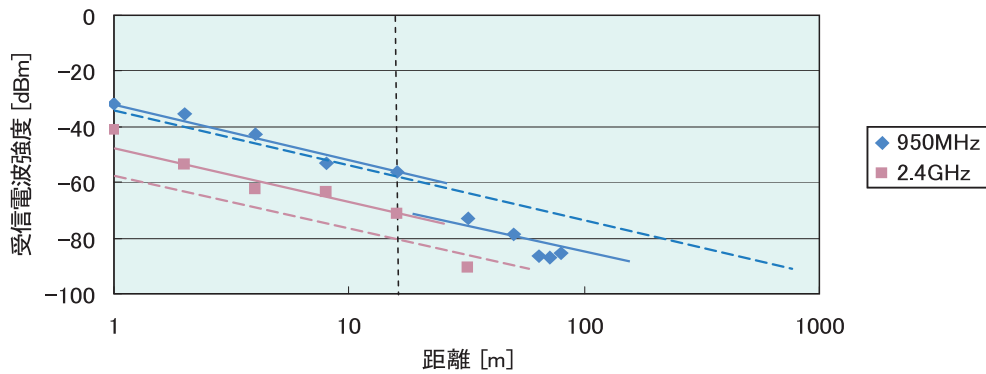
図5-15 山下りコース、送信センサーノードアンテナ高0m  
のときのパケットロス率



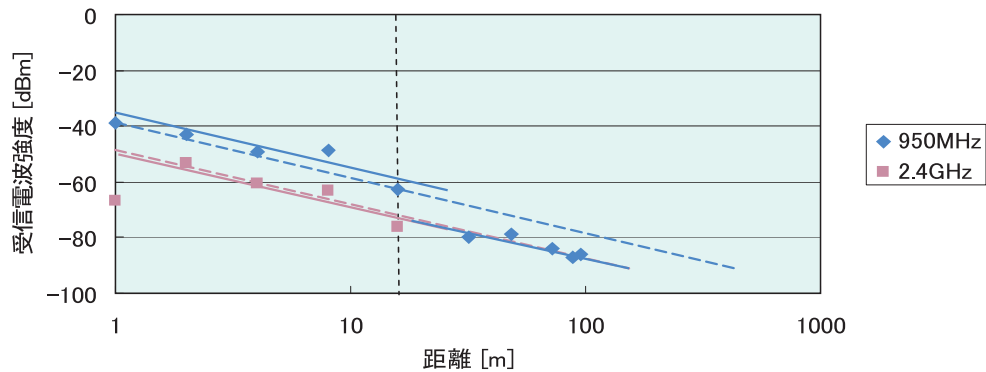
#### 4 丘により見通しが遮られた場合の伝搬試験

丘越えコースでの受信電波強度の測定結果を図5-16(a)~(c)に示す。比較のため、平坦平地での測定結果の近似線を破線で重ねる。

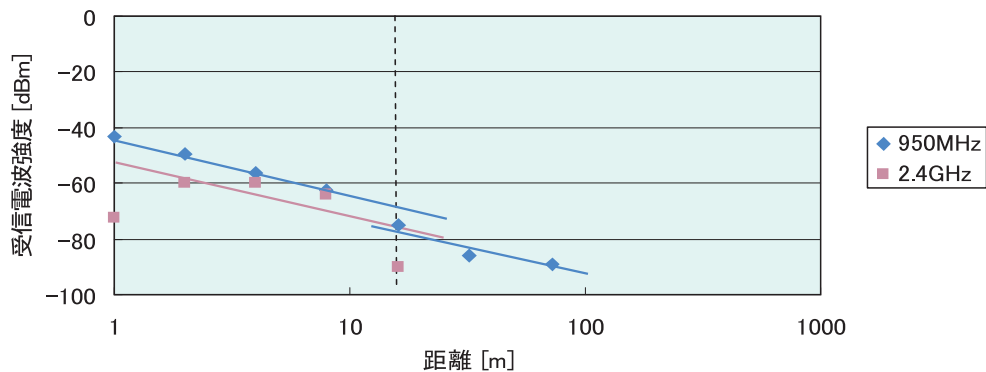
固定した受信センサーノードから16mの距離にある丘の頂上を越えると、地面による遮蔽が大きくなり、2.4GHz帯では通信ができなくなる。一方、950MHz帯では大きく減衰するものの丘の陰に入っても通信可能であった。回折効果によるものと考えられる。



(a) 送信センサーノードアンテナ高 2 m



(b) 送信センサーノードアンテナ高 0.5 m

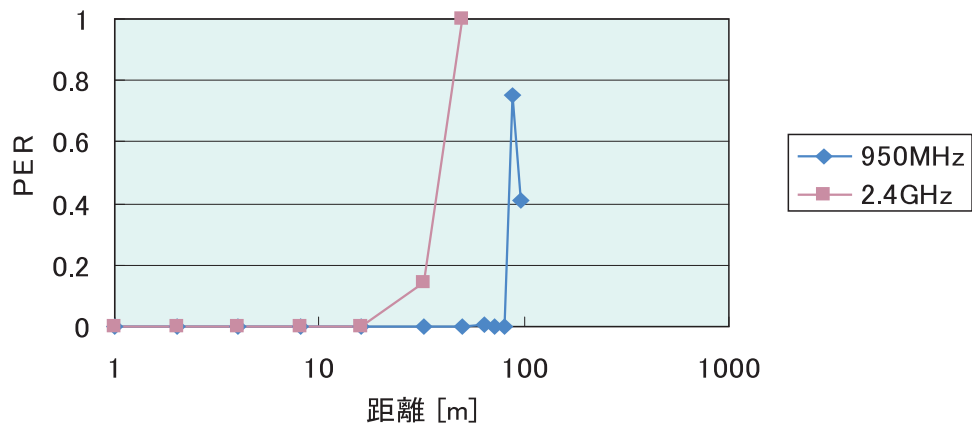


(c) 送信センサーノードアンテナ高 0 m

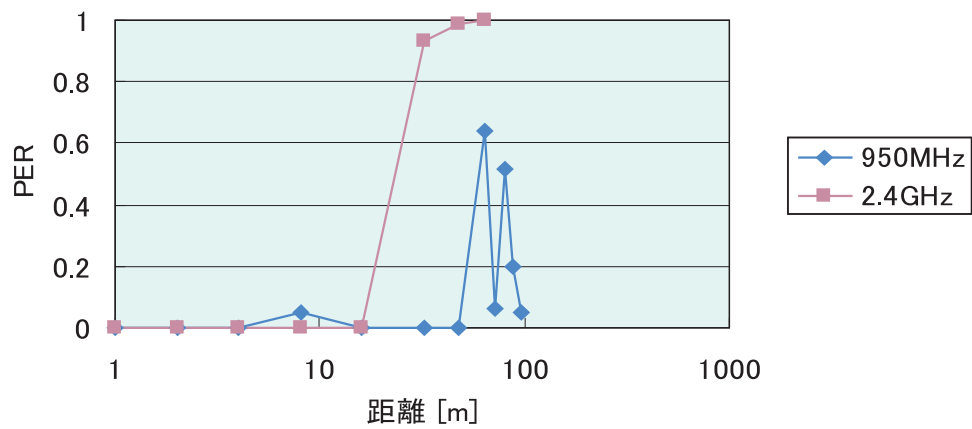
図5-16 丘越えコースでの受信電波の強度



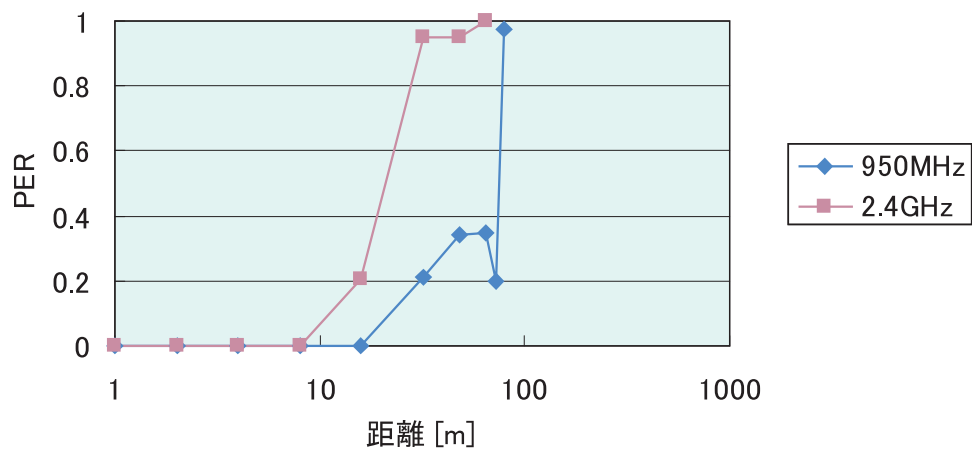
丘越えコースでのパケットロス率を図5-17(a)~(c)に示す。



(a) 送信センサーノードアンテナ高 2 m



(b) 送信センサーノードアンテナ高 0.5 m



(c) 送信センサーノードアンテナ高 0 m

図5-17 丘越えコースでのパケットロス率

## 5 積雪の影響を調べるための伝搬試験

### (1) 測定場所

積雪の影響だけを見るために、地面の雪以外の条件はすべて平成20年12月に実施したときと同一とした。固定した受信センサーノード設置場所付近から見た各コースの景観を写真5-5(a)~(c)に示す。



(a) 山下りコース



(b) 平地コース



(c) 丘越えコース

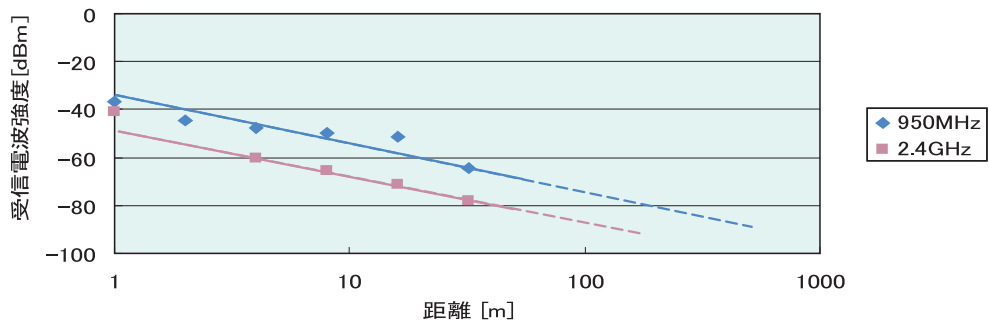
図5-5 積雪時の測定コースの景観

## (2) 測定結果

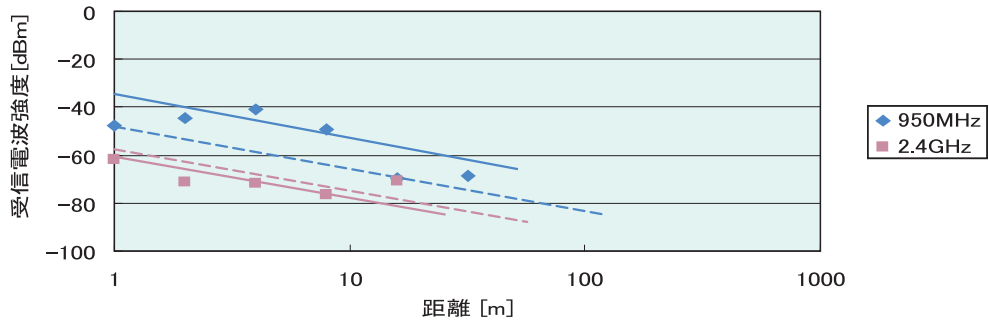
### ア 「山下り」コースの場合

積雪時の山下りコースでの受信電波強度の測定結果を図5-18(a)~(c)に示す。比較のため、雪の無い時期に行った結果の近似線を破線で示す。

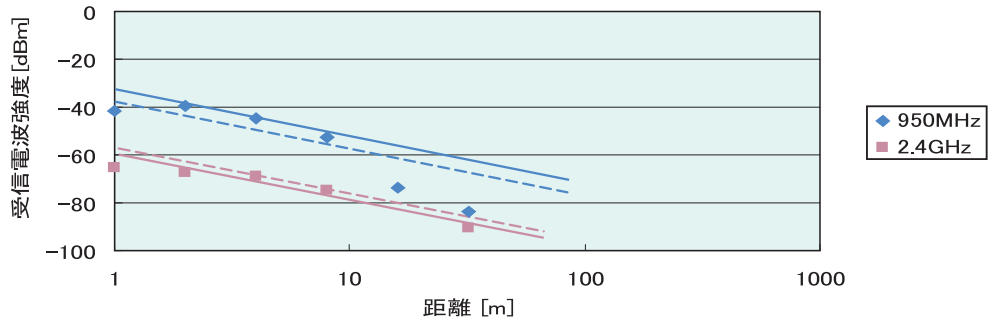
送信センサーノードアンテナ高0.5mの950MHzだけは例外であるが、ほぼ積雪の影響はないものと考えられる。



(a) 送信センサーノードアンテナ高 2 m



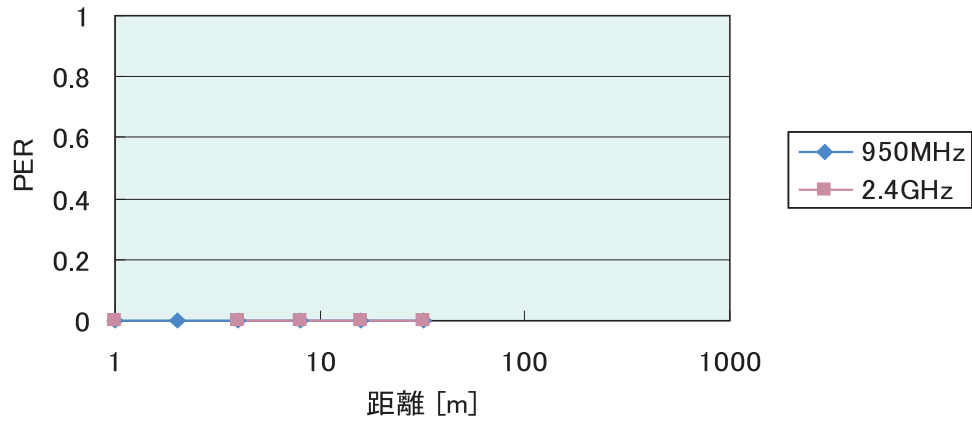
(b) 送信センサーノードアンテナ高0.5m



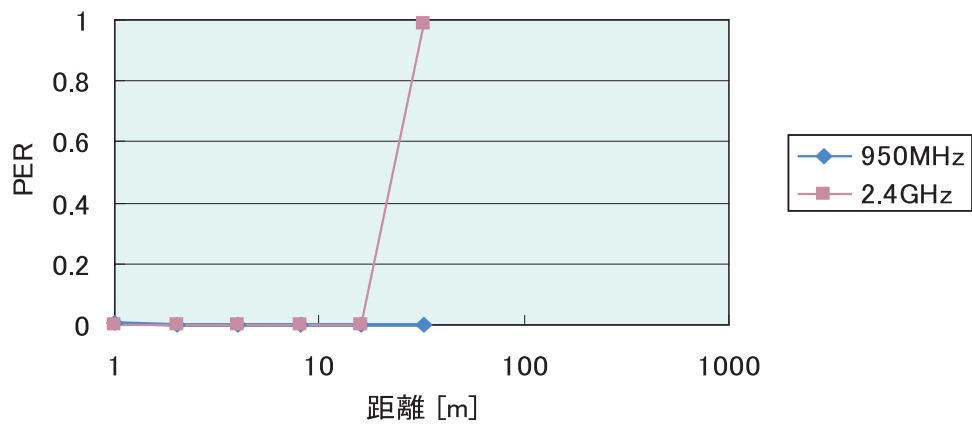
(c) 送信センサーノードアンテナ高 0 m

図5-18 山下りコース、積雪時の受信電波強度

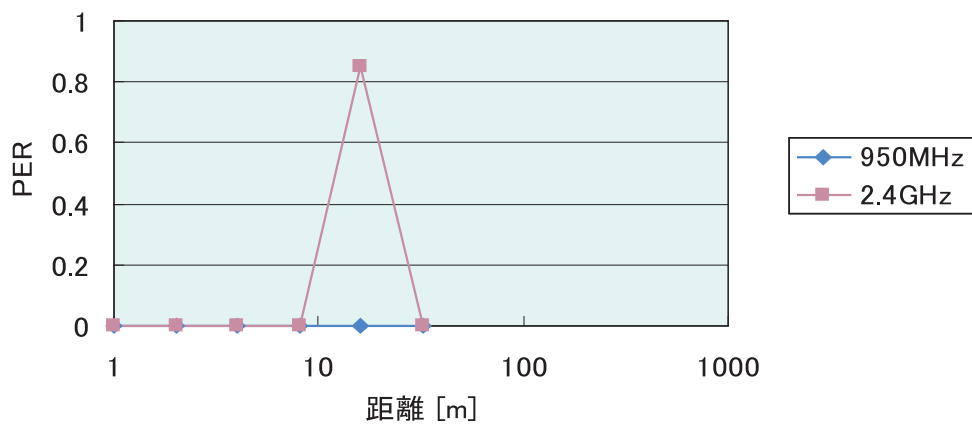
積雪時の山下りコースでのパケットロス率を図5-19(a)~(c)に示す。



(a) 送信センサーノードアンテナ高 2 m



(b) 送信センサーノードアンテナ高 0.5 m



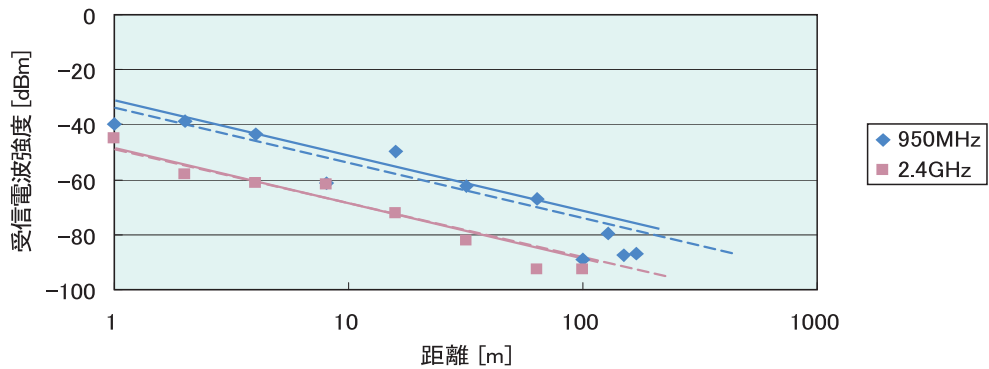
(c) 送信センサーノードアンテナ高 0 m

図5-19 山下りコース、積雪時のパケットロス率

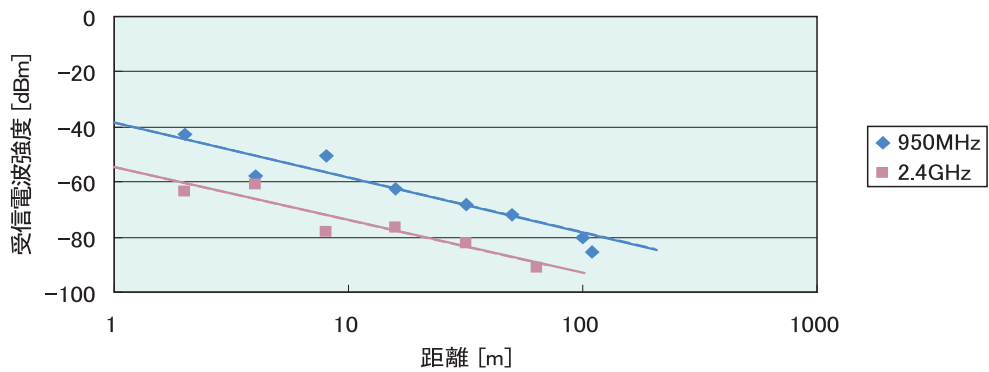
イ 「平地」コースの場合

積雪時の平地コースでの受信電波強度の測定結果を図5-20(a)~(c)に示す。比較のため、平坦平地での測定結果の近似直線を破線で重ねる。

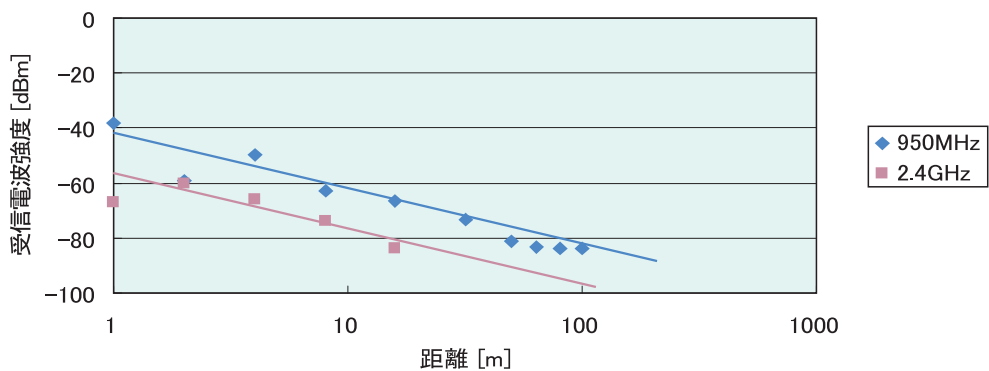
平地コースの結果からも、ほぼ積雪の影響はないと考えられる。



(a) 送信センサーノードアンテナ高 2 m



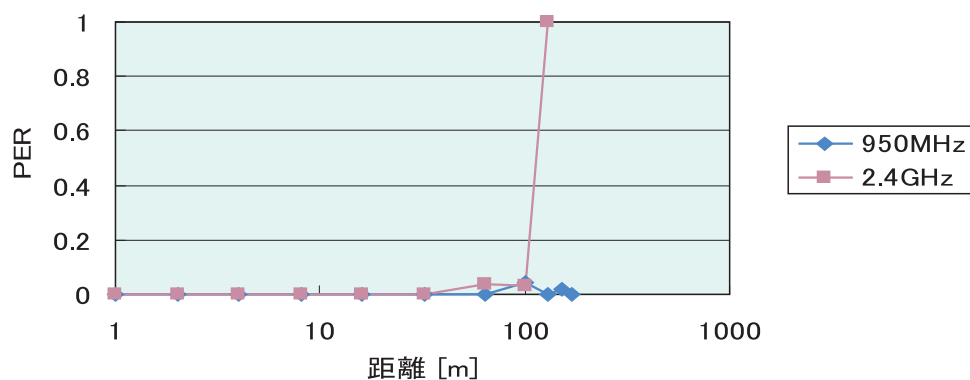
(b) 送信センサーノードアンテナ高0.5m



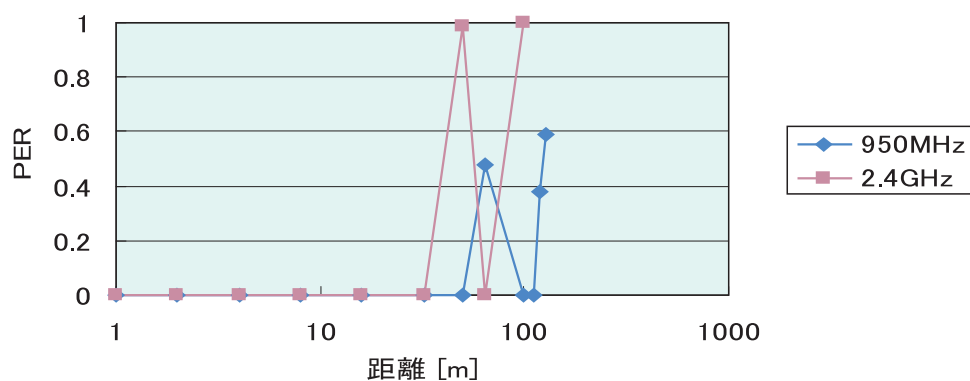
(c) 送信センサーノードアンテナ高 0 m

図5-20 平地コース、積雪時の受信電波強度

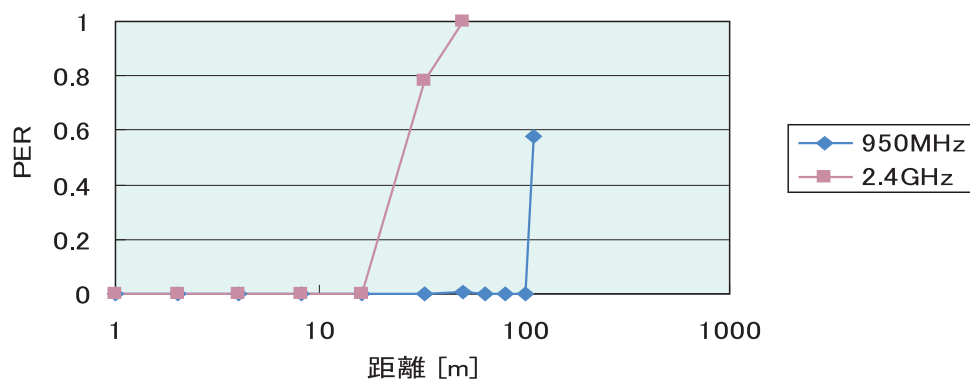
積雪時の平地コースでのパケットロス率を図5-21(a)~(c)に示す。



(a) 送信センサーノードアンテナ高 2 m



(b) 送信センサーノードアンテナ高 0.5 m



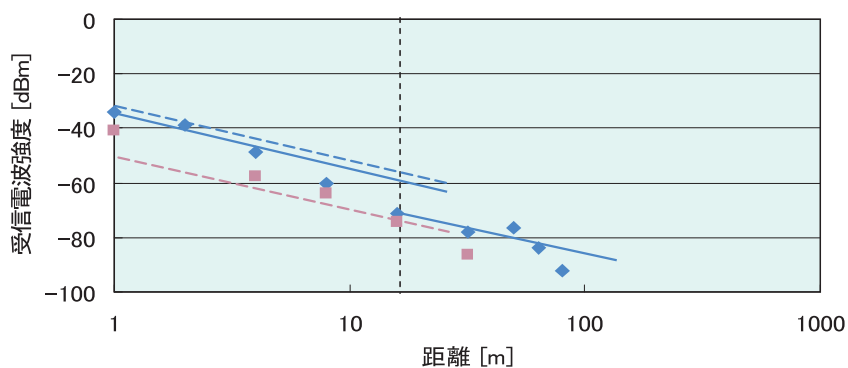
(c) 送信センサーノードアンテナ高 0 m

図5-21 平地コース、積雪時のパケットロス率

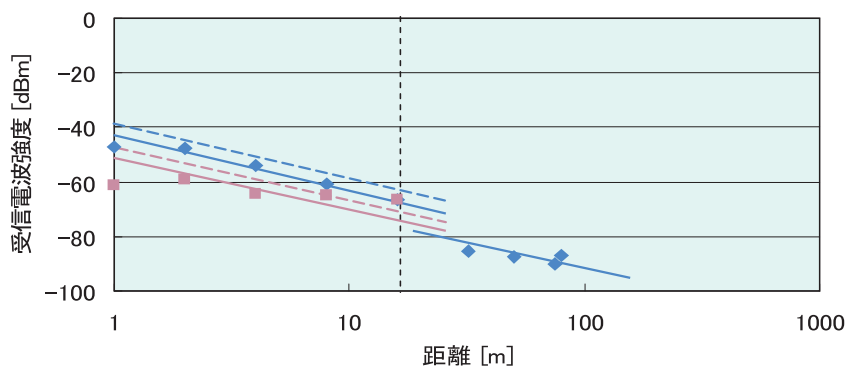
ウ 「丘越え」コースの場合

積雪時の丘越えコースでの受信電波強度の測定結果を図5-2(a)~(c)に示す。比較のため、積雪のない状態での丘越えコースの近似直線を破線で示す。

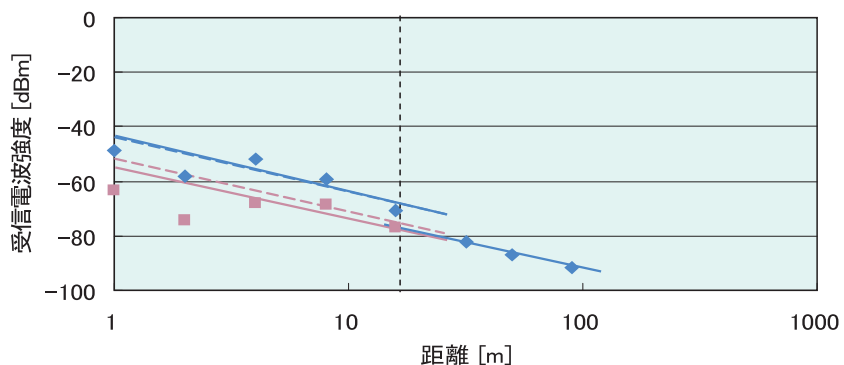
グラフからは積雪の影響を明確に読み取ることはできない。



(a) 送信センサーノードアンテナ高 2 m



(b) 送信センサーノードアンテナ高0.5m

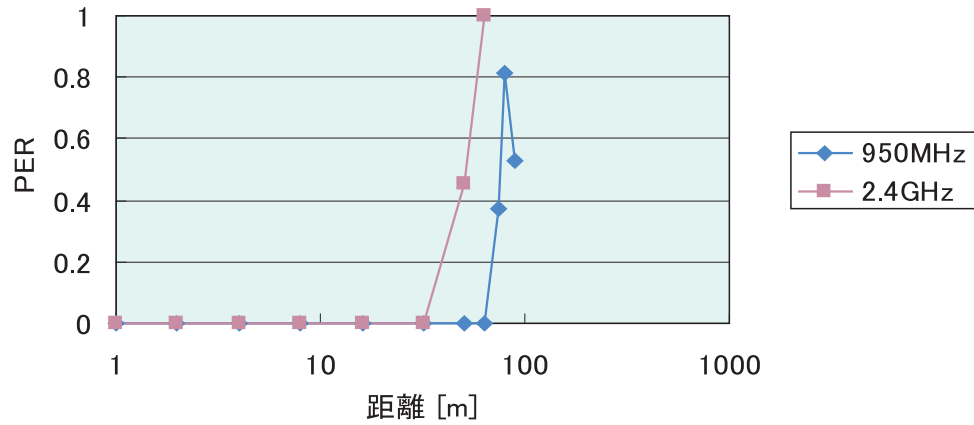


(c) 送信センサーノードアンテナ高 0 m

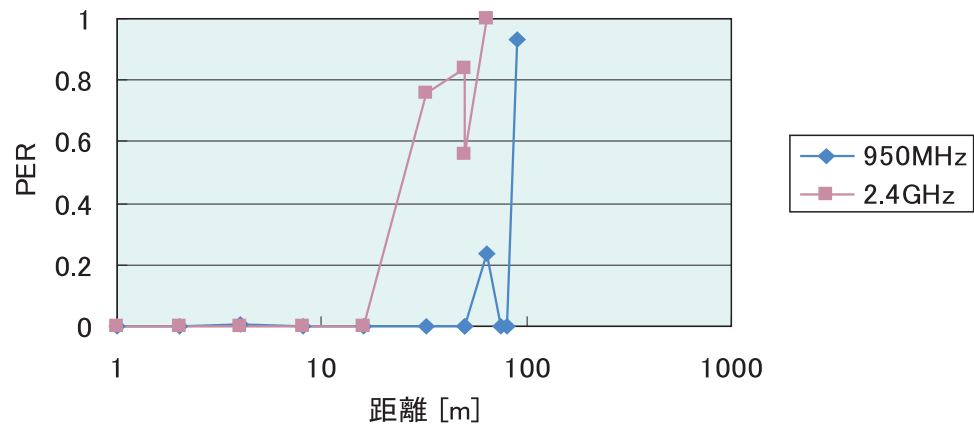
図5-22 丘越えコース、積雪時の受信電波強度



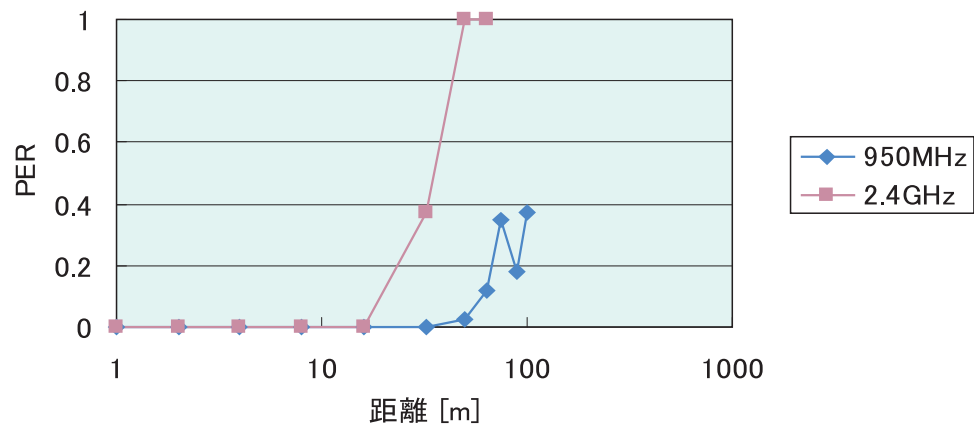
積雪時の丘越えコースでのパケットロス率を図5-23(a)~(c)に示す。



(a) 送信センサーノードアンテナ高2m



(b) 送信センサーノードアンテナ高0.5m



(c) 送信センサーノードアンテナ高0m

図5-23 丘越えコース、積雪時のパケットロス率

## 6 センサーノードを雪で覆ったときの影響

センサーノードが雪に埋もれた場合どのような影響があるかを調べるため、センサーノードに雪をかぶせて測定を行った。

雪の中に埋もれた送信センサーノードから3mの距離にアンテナ高2mの受信センサーノードを置き、雪の厚さを少しずつ増しながら電波の強度を測定した。測定の様子を写真5-6(a)~(f)に示す。



(a) 雪をかぶせない状態



(b) 雪で覆った状態  
(ケース上端から10cm厚)



(c) 雪で覆った状態  
(ケース上端から40cm厚)



(d) 雪で覆った状態  
(ケース上端から80cm厚)



(e) 雪で覆った状態  
(ケース上端から100cm厚)

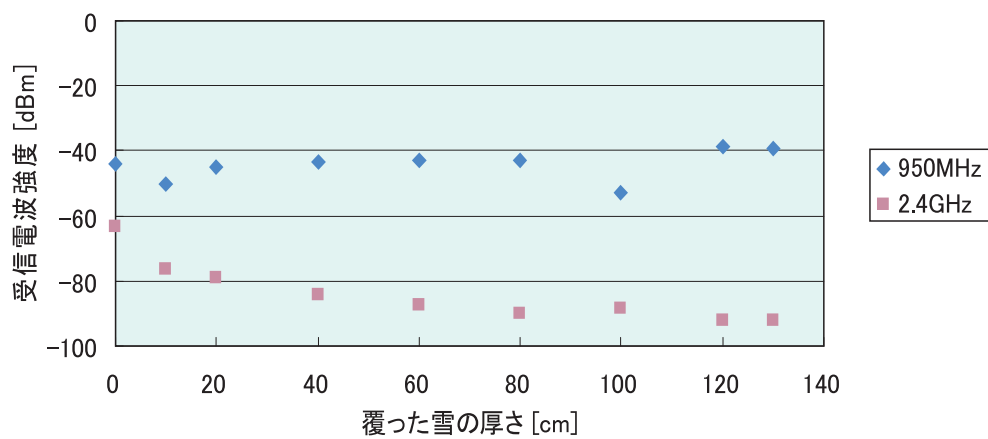


(f) 雪で覆った状態  
(ケース上端から130cm厚)

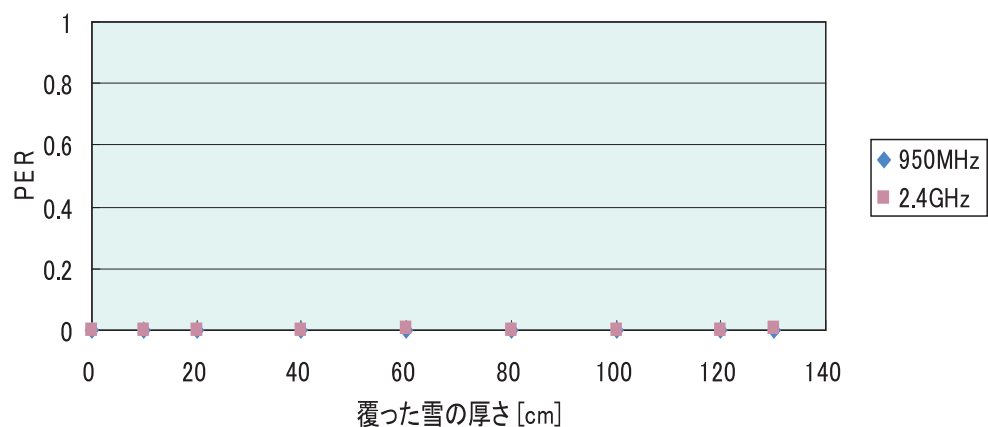
写真 5 - 6 雪で送信センサーノードを覆った写真

送信センサーノードを雪で覆ったときの受信電波強度とパケットロス率の関係を図5-24(a)~(b)に示す。横軸は防水ケースの上端からの雪厚を示している。この結果から、2.4GHzは雪厚に応じて徐々に損失が増加するのに対し、950MHzでは、130cm程度の雪厚ではほとんど影響がないことが確認できた。

積雪は空気を含んだ氷の結晶が固まったものであるから、水とは異なりわずかな隙間があり、このことが電波を透過させるものと考えられる。また、2.4GHz帯の波長がより短いにもかかわらず透過損失が大きいのは、雪の粒や隙間と波長との関係と考えられる。



(a) 受信電波強度



(b) パケットロス率

図5-24 送信センサーノードを雪で覆ったときの受信電波強度とパケットロス率

## 7 動物体の影響

さらに、動物にセンサーノードを装着したときの様子を調べるため、人間の手で遮蔽した場合の測定も行っており、その様子を写真5-7に示す。

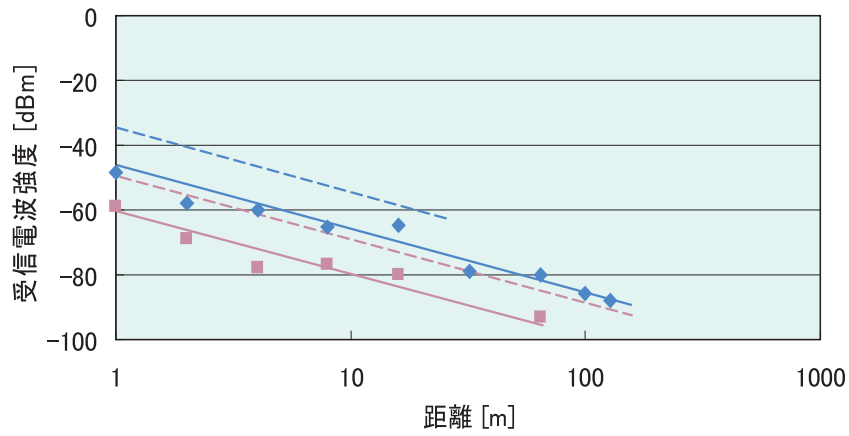


写真5-7 手による遮蔽の様子

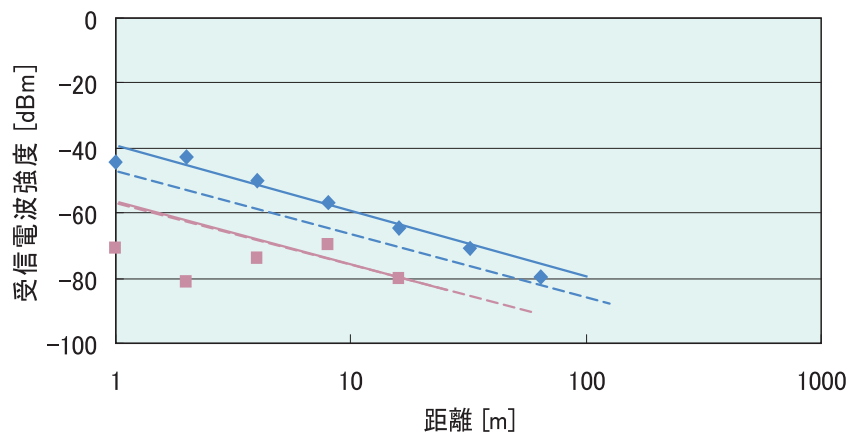
山下りコースにて手で遮蔽したときの受信電波強度の測定結果を図5-25(a)~(c)に示す。比較のため、同コースで遮蔽しない場合を破線で重ねた。

送信センサーノードのアンテナ高2mにおいて、手で遮蔽した場合は950MHz、2.4GHz双方とも約10dBmほど減衰している。人間の手の厚さでこの程度の減衰が発生するということは、クマ等の動物の胴体にセンサーノードを装着したとすれば、胴体は手よりもはるかに厚みがあるため、この陰になる方向での減衰は人間の手以上になるものと考えられる。

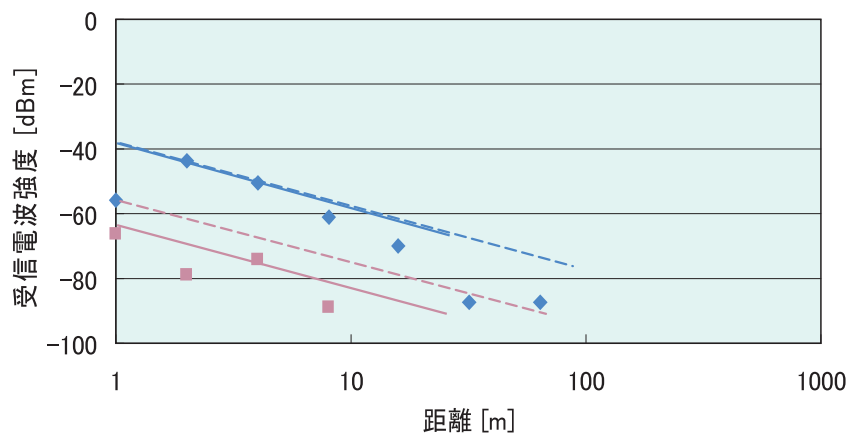
安定した通信を確保し到達距離を伸ばそうとする場合は、いかなるときでも体の陰にならないような部位（首の背中側など）にセンサーノードを取り付けるなどの工夫が必要である。一方、送信センサーノードアンテナ高が0mのときと0.5mのときは、人の手で遮蔽した方が受信電力は高かった。電波を遮断された方がより強いということは通常の電波伝搬では説明がつかない。おそらく、遮蔽するために送信センサーノードのそばに座った人の体が手で遮断した方向以外に輻射された電波を反射して受信センサーノードに届いたのが原因ではないかと考える。



(a) 送信センサーノードアンテナ高2m



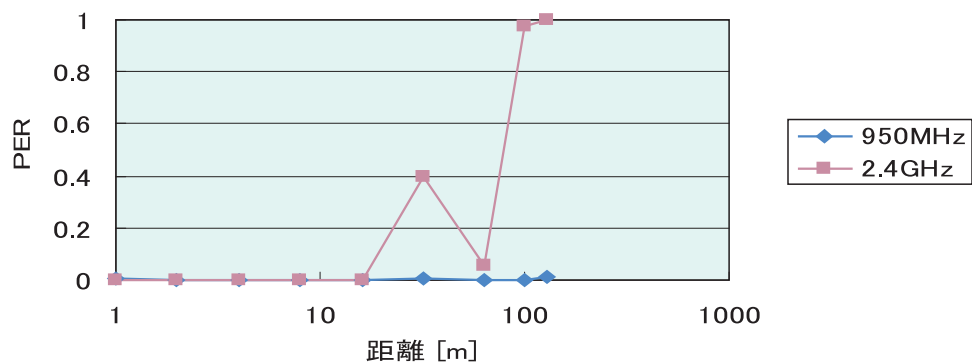
(b) 送信センサーノードアンテナ高0.5m



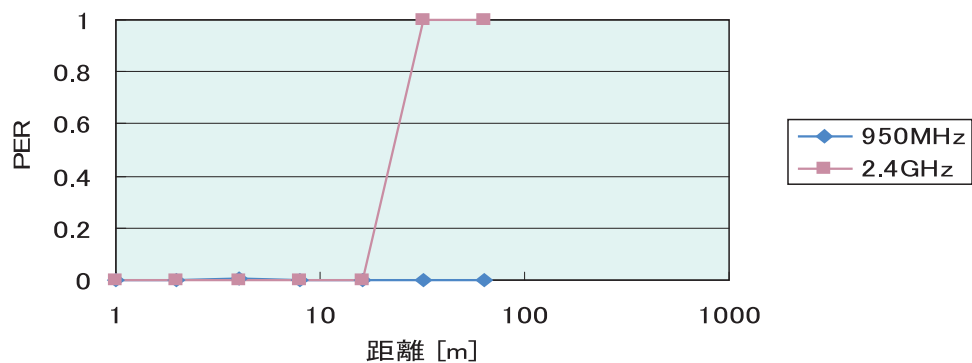
(c) 送信センサーノードアンテナ高0m

図5-25 山下りコースにて電波を人間の手で遮蔽したときの受信電波強度

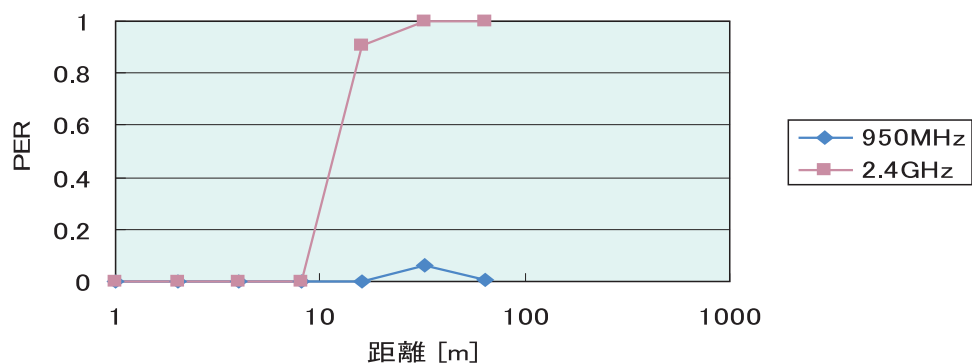
山下りコースで人間の手により遮蔽したときのパケットロス率を図5-26(a)~(c)に示す。2.4GHz帯ではすべてのアンテナ高で手で遮蔽しない場合と比較して、ロス率が高くなる距離が短くなっており、遮蔽によりパケットロスが多くなることを示している。



(a) 送信センサーノードアンテナ高 2 m



(b) 送信センサーノードアンテナ高 0.5 m



(c) 送信センサーノードアンテナ高 0 m

図5-26 山下りコースにて電波を人間の手で遮断したときのパケットロス率



## 8 動物の巣穴の影響

動物が巣穴に入ったときに通信できるかどうかを調査するため、木の穴やモグラの穴での損失を測定した。図5-27のように、それぞれの巣穴から3mの距離にアンテナ高2mの受信センサーノードを設置し、穴の中に設置した送信センサーノードから発射された電波の強度を測った。

また、写真5-8(g)のように幹を挟んだ状態で送受信センサーノードを設置した場合の減衰量も測定した。



図5-27 巣穴での測定

測定した巣穴及び幹を挟んだ様子は写真5-8(a)~(h)に示す。



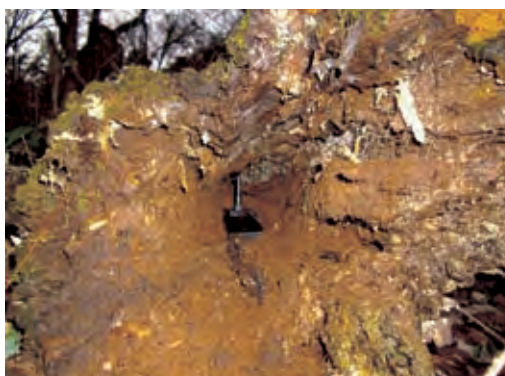
(a) 木の穴① (外)



(b) 木の穴① (中)



(c) 木の穴② (外)



(d) 木の穴② (中)



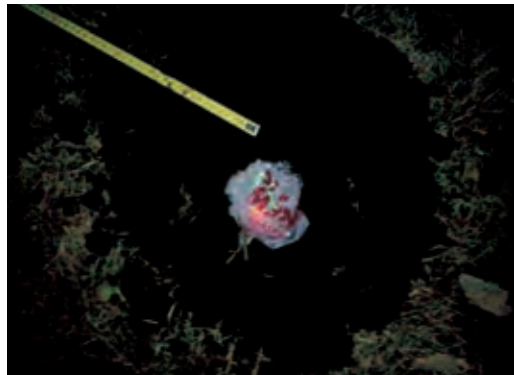
(e) 木の穴③ (外)



(f) 木の穴③ (中)



(g) 幹を挟んだ両端



(h) モグラの穴 (土をかぶせる前)

写真5-8 試験に使用した様々な巣穴と幹の透過試験の様子

測定結果を表5-2にまとめた。巣穴は入口を開放した状態で測定しているため、反射等により回り込んで電波が到達している。ただし、モグラの穴の測定では、表面に10cm程度の土をかぶせて測定した。

表の結果から、950MHz帯の方が2.4GHz帯に比較して透過性が高いことが確認できた。

表 5 - 2 巣穴等による減衰の結果

測定条件等		950MHz	2.4GHz
見通し	開放空間値 (基準)	-53.5 dBm	-58.4 dBm
木の穴① 写真(a)(b)	穴の中	-64.0 dBm	-82.7 dBm
	減衰	10.5 dB	24.3 dB
木の穴② 写真(c)(d)	穴の中	-62.3 dBm	-90.8 dBm
	減衰	8.8 dB	32.4 dB
木の穴③ 写真(e)(f)	穴の中	-71.4 dBm	-93.1 dBm
	減衰	17.9 dB	34.7 dB
モグラの穴 写真(h)	穴の中	-57.9 dBm	-82.6 dBm
	減衰	4.4 dB	24.2 dB
木の両端 写真(g)	見通し	-30.3 dBm	-44.1 dBm
	両端	-59.2 dBm	-77.3 dBm
	減衰	28.9 dB	33.2 dB

## 9 電波伝搬試験結果のまとめ

### (1) 平地と山間部の違い

地面の起伏による影響は大きく、特に2.4GHz帯での減衰は著しく、見通しが利かない状態になるとすぐに通信不能に陥る。一方、950MHz帯では減衰はあるものの、なだらかな丘程度の遮断物ではこれを越えて到達することが分かった。フィールド試験を行ったような環境下での到達距離は平地の見通しの良い場所と比較すると半分程度と見込める。

### (2) 樹木の影響

落葉樹林での減衰量はセンサーノードの地上高により異なるが、おおむね数dB～10dB程度である。試験時期の関係で葉が密に生い茂った樹林での測定はできなかったが、文献<sup>1</sup>によると葉が密生した樹林等の減衰量は、樹種、樹形、葉の密度、複素誘電率等の多くのパラメータが存在しモデル化は困難であり、状況に応じて定量化しなければならないようである。

### (3) 950MHz帯と2.4GHz帯との比較

装置の受信感度を同一と仮定した場合、今回の各試験条件において、950MHz帯の到達距離は、2.4GHz帯の約2倍程度を実現できると考えられる。

### (4) 受信電力と伝搬距離との関係

本試験のようにアンテナの高さが比較的低く、地面が遮蔽物としてフレネルゾーン内に入るような条件となる伝搬距離以上では、距離の $-2$ 乗以上の急な傾きで減衰する。地面の影響を受けないようにするために、伝搬路全区間において地面がフレネルゾーン内に入らないように、送受信双方のセンサーノード、又はいずれか一方でも可能な限り高い位置に設置することが望ましい。

### (5) 積雪の影響

地面の積雪は、電波伝搬にはほとんど影響が無いことが確認できた。また、センサーノードを雪で覆った場合でも950MHz帯では雪厚130cm程度ではその影響がほとんど無いことも確認できた。

### (6) 巣穴の影響

センサーノードが木や地面の巣穴に入った場合、950MHz帯では10dB程度の減衰が発生する。センサーノードがこのような状態になると想定される生態観察のような用途では、このセンサーノードの通信相手となるセンサーノードは巣穴の近くに設置することが必要である。

---

<sup>1</sup> 電波伝搬ハンドブック REALIZE INC.



(7) 幹の電波の透過性

幹を挟み込むように幹から10cm程度離して両側にノードを配置して減衰量を測定した結果、30dB前後の損失があった。幹は電波の透過性が悪いので、センサーノードを幹に取り付けて使用する場合は、幹方向の電波は相当弱くなることを認識しておかなければならない。

(8) 樹林内での到達距離

今回の950MHz帯 1 mWの測定では、丘越えでも100m近い到達距離が得られたが、フィールド試験を行った場所よりも起伏が激しい環境で使用する場合はマージンを見込み到達距離として50mを一つの目安と考える。送信出力を10mWまで高めた場合、理論上到達距離は $\sqrt{10}$ 倍になるが環境により多少これよりも伸びないことがあるので、目安としては100m~200m程度が妥当と考える。

なお、山頂や尾根など見晴らしの良い地点間においては、山間部であっても平坦平地と同等の到達距離が確保できることから、送信出力10mWのセンサーノードでは300~500m、あるいはそれ以上の距離で通信が可能と考える。

(9) IEEE802. 15. 4d準拠の装置を使用した場合との違い

ア 今回用いた950MHzの装置は、IEEEで標準化が進められているIEEE802. 15. 4d完全準拠ではない。本来は、IEEE802. 15. 4d GFSK方式を用いる予定であったが、開発が間に合わなかったため一部諸元の異なる方式を使用した。相違点を表5-3に示す。

表5-3 IEEE802. 15. 4dの規定と今回使用した装置の諸元の相違点

	測定に使用したノード	IEEE802. 15. 4d規定 (GFSK方式)
変調方式	FSK方式	GFSK方式
伝送レート	90kbps	100kbps
信号の帯域幅	200kHz	400kbps

イ 補正の必要性に関する検討

今回、IEEE802. 15. 4d (GFSK方式) と異なる諸元で測定したことによる補正の要否についての検討は以下の通りであるが、特に補正は必要ないとの結論に達した。

(ア) 変調方式

GFSK方式のFSK方式との違いは以下の2点である。

A 変調信号 (0, 1をあらわすパルス列) をガウスフィルタで波形整形している。

B 周波数偏移がGFSKのほうが2倍多い。

距離に対する平均受信電力特性は、変調方式が異なっても同じと考えて良いので、変調方式の違いによる補正は必要ない。

(イ) 帯域幅

信号の帯域幅の違いにより、受信電力の時間変動特性が変わる。帯域幅が広いほど、変動が小さい測定値（平均化された値）が得られる。ただし、今回の測定では、平均受信電力を使用しているため、この差も考慮する必要はない。

以上の検討より、今回測定に使用したノードによる結果を補正する必要はないと判断した。

### 第3節 伝搬経路及び伝搬損失に関する考察

#### 1 フレネルゾーンに関する検討

今回のフィールド試験のようにアンテナ高が2mやそれ以下に設定してある場合、送信ノードと受信ノードの間の大地の影響が排除できない。このため完全な自由空間伝搬として電波伝搬の計算をするには無理がある。その理由は前述したとおり大地の反射による影響であるが、さらに伝搬経路内にフレネルゾーンがかかってしまうことである。

送信センサーノードから受信センサーノードへ電波が伝搬するとき、電波は直線上を伝搬するのではなく、図5-28のように広がりを持つ。この広がりをフレネルゾーン<sup>1</sup>といい、直接波との経路差が $\lambda/2$ となる点を結んだ楕円を特に第1フレネルゾーンという。(以下、本報告書ではフレネルゾーンと記す)第1フレネルゾーン内に遮蔽物があると電波は減衰する。一般的にフレネルゾーン半径の60%以内に障害物がなければその影響は比較的軽微であると言われている。

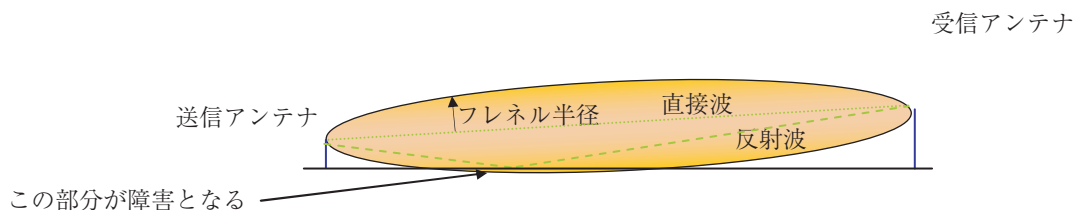


図5-28 フレネルゾーン

送受信アンテナ高と伝搬路長との関係によっては、地面がフレネルゾーン内に入る。このような条件下では自由空間における伝搬損失以上の伝搬損失が発生する。送受信装置のどちらか一方を固定し、他方を固定した方から少しずつ遠ざけていくと、ある距離を超えた時点で大地がフレネルゾーン内に入る。こうなると伝搬特性は距離の $-2$ 乗に比例して減衰するという近似直線には乗らなくなる。

フレネルゾーンの幅は伝搬路の丁度中間地点で最も広くなる。参考までに、伝搬距離ごとの950MHzと2.4GHzのフレネルゾーンの半径の最大値を表5-4に示す。

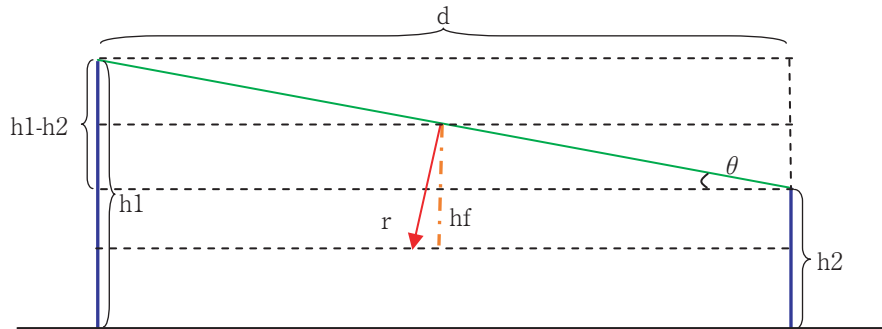
<sup>1</sup> 参考文献：高田，“移動体衛星通信のための電波伝搬再入門”，信学技報



表5-4 伝搬距離と最大フレネルゾーン半径との関係

伝搬距離 (m)	フレネルゾーンの半径 (m)	
	950MHz	2.4GHz
1	0.28	0.18
5	0.63	0.40
10	0.89	0.56
30	1.54	0.97
50	1.99	1.25
100	2.81	1.77
300	4.87	3.06
500	6.28	3.95
800	7.95	5.00
1,000	8.89	5.59

送信アンテナ高 $h_1$ 、受信アンテナ高 $h_2$ の場合、地面がフレネルゾーン内に入るのはどのようなときかを考える。最大フレネルゾーン半径は伝搬区間の中間点であるから、この地点における値を代表的な例として考察する。



$h_1$  : 送信アンテナ高       $h_2$  : 受信アンテナ高       $d$  : 区間距離  
 $r$  : フレネル半径       $hf$  :  $r$ の垂直投影長 (伝搬路の地上高)  
 $\theta$  : 低いアンテナから高いアンテナを見た角度

図5-29 フレネルゾーンが地面に接触する地点の地上高を計算する図

$$\tan \theta = \frac{h_1 - h_2}{d} \qquad \theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{(h_1 - h_2)}{d} \right\}$$

$$hf = r \cos \theta$$

計算によると、950MHzと2.4GHzのそれぞれの電波は表5-5に示す距離以上の伝搬路長を有する場合、地面がフレネルゾーンに達する。

表5-5 地面がフレネルゾーンに達する伝搬路長

送信 アンテナ高 (m)	受信 アンテナ高 (m)	地面がフレネルゾーンに達してしまう 送受信点間の区間距離 (m)	
		950MHz	2.4GHz
2	2	50.5	128.0
2	0.5	19.5	50.0

計算では、送受信それぞれのアンテナ高が2 mのとき、950MHzでは伝搬距離が50.5 m、2.4GHzの場合は128mを越えるとフレネルゾーンが大地に接触する。送信アンテナ高が2 m、受信アンテナ高が0.5mの場合は、950MHz、2.4GHzではそれぞれ伝搬距離が19.5m、50mを越えるとフレネルゾーンが大地に接触する。

障害物がフレネルゾーン半径のおおむね60%以上を遮ると伝搬損失は顕著になる。表5-6は、そのような条件が伝搬路に発生することとなる伝搬路長を計算したものである。この距離以上長い伝搬路ではフレネル損失がとて大きくなる。

表5-6 大地がフレネルゾーンに接触し大きな減衰となる伝搬路長

送信アンテナ高 (m)	受信アンテナ高 (m)	フレネルゾーン半径の60%値に大地が接触してしまう送受信点間の距離 (m)	
		950MHz	2.4GHz
2	2	140.5	355.5
2	0.5	54.5	138.5

このように、フレネル損失だけを見ればアンテナの地上高が低い場合、波長の長い950MHz帯の電波は2.4GHz帯の電波よりも不利である。

なお、フレネルゾーンは図5-30に示す回転楕円体であり、その半径  $r$  は次式で表せる。

$$r = \sqrt{\lambda \frac{d1 \cdot d2}{d1 + d2}}$$

d1: 送信点からフレネル半径を求めようとする場所までの水平距離  
d2: 受信点からフレネル半径を求めようとする場所までの水平距離  
 $\lambda$ : 波長      h1: 送信アンテナ高      h2: 受信アンテナ高

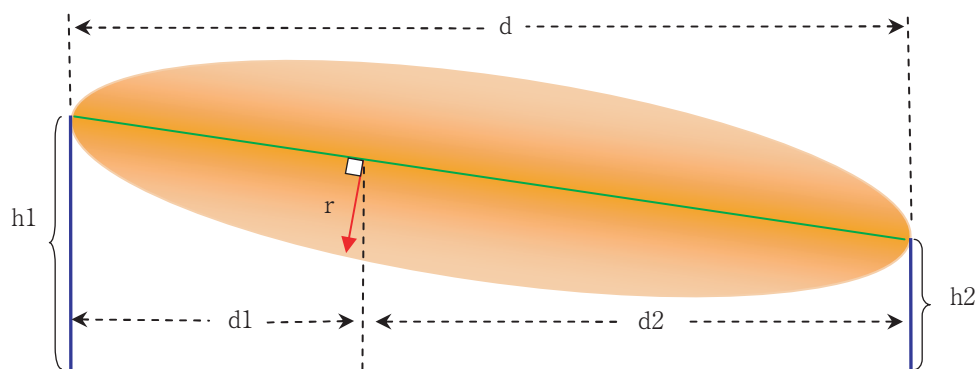


図5-30 フレネルゾーンの半径

## 2 経路品質指数に関する考察

### (1) パスロス（伝搬損失）

一般に高速無線LANのパスロス計算式として、実験的に求められた次式が使われている。

$$\text{PathLoss} = 20\log_{10}f + 10n\log_{10}d - 28.0 \quad (\text{dB})$$

パスロス PathLoss  
 伝搬距離 d (m)  
 周波数 f (MHz)  
 経路品質指数 n

表5-7 経路品質指数と環境

経路品質指数 n	一般的な環境
2	見通しの良好な室外
2.5	電波伝搬環境の良い室内
3.0	電波伝搬環境のあまり良くない室内
4.0	電波伝搬環境のかなり悪い室内

例として、見通しの良好な室外における950MHzと2.4GHzの伝搬距離100mの場合のパスロスを計算する。

#### ア 950MHz

$$\text{PathLoss} = 20\log_{10}f + 10n\log_{10}d - 28.0$$

上式に  $f = 950$

$n = 2$

$d = 100$  を代入して

$$\text{PathLoss} = 71.6 \quad (\text{dB})$$

#### イ 2.4GHz

$$\text{PathLoss} = 20\log_{10}f + 10n\log_{10}d - 28.0$$

上式に  $f = 2400$

$n = 2$

$d = 100$  を代入して

$$\text{PathLoss} = 79.6 \quad (\text{dB})$$

アとイの結果から、950MHzと2.4GHzの電波ではパスロスに8dBの差があることが分かる。これは周波数の違いに起因する本質的なものである。

(2) 経路品質指数に関する考察

一方、IEEE802.15.4で規定するZigBeeの最低受信感度は表5-8のとおり。

表5-8 IEEE802.15.4で定めるZigBeeの最低受信感度

周波数帯	最低受信感度 (dBm)
866/915 MHz 帯	-92
2.4GHz 帯	-85

実際に売られている製品は表5-8に示す感度よりも良好で周波数帯によらず-92~-97dBmの範囲のようである。

(3) 最大到達距離

通信可能な最大到達距離  $d$  は、外来ノイズなどの条件を除外すれば、

$$\text{【受信感度】} = \text{【送信電力】} - \text{【パスロス】}$$

となったときである。

すなわち、

$$SR_x = PT_x - \text{PathLoss}$$

$SR_x$  : 受信感度 (dBm)

$PT_x$  : 送信電力 (dBm)

PathLoss : パスロス (dB)

$$SR_x = PT_x - (20\log f_{10} + 10n\log_{10}d - 28.0)$$

この式を距離  $d$  について解くと、

$$d = 10^{\frac{PT_x - SR_x - 20\log_{10}f + 28}{10n}}$$

この式を基に、センサーノードの受信感度を-85dBm、-92dBmに設定した場合、950MHzと2.4GHzのそれぞれについて経路品質指数に対応する最大到達距離を計算した結果が表5-9である。なお、送信電力はすべて1mW (0dBm)としている。

表5-9 環境及び受信感度の違いによる  
送信電力1mWセンサーノードの通信可能距離

周波数		950MHz		2.4GHz		到達距離の比	
受信感度 (dBm)		-85 (A)	-92 (B)	-85 (C)	-92 (D)	(A)/(C)	(B)/(D)
経路品質指数 n	2	470	1,053	186	417	2.53	2.53
	2.5	137	262	65	125	2.18	2.10
	3.0	60	103	33	56	1.82	1.84
	4.0	22	32	14	20	1.57	1.60

計算上の通信可能距離であり、受信電力=送信電力-パスロスとなる距離である。

表5-9から950MHz帯の電波は2.4GHz帯の電波に比べて電波伝搬環境の劣化に伴う到達距離の減少率が大きいことが分かる。感覚的には950MHz帯の電波は伝搬条件が悪くてもその影響は少ないものと思われがちであるが、パスロスの計算式に実際に数字を代入して検討してみると反対の結論が導き出される。

このことは、950MHz帯の電波における樹木による減衰は約10dB生ずるにもかかわらず、2.4GHz帯ではその影響が小さいというフィールド試験結果とも一致している。

#### (4) 山間部における伝搬路の経路品質指数を推定する

試験結果のグラフから近似直線（対数近似）の式を起こして経路品質指数の逆算を試みる。

##### ア 落葉した非密生林で土地の起伏が少ない場合

送受信センサーノードのアンテナ高が双方とも2mのときについて考察する。

使用するグラフは43ページの図5-10である。近似直線の計算（対数近似）の結果次の式を得る。

$$y = -11.623 \ln(d) - 32.825 \dots \dots \text{(式A)}$$

ln：自然対数（底 e）

一方、パスロスを実験から求めた計算式は次式である。

$$\text{PathLoss} = 20 \log_{10} f + 10 n \log d - 28.0 \quad (\text{dB}) \dots \dots \text{(式B)}$$

伝搬距離 d (m)

周波数 f (MHz)

経路品質指数 n

(式A)は図5-10のグラフが受信電力と距離との関係を示しているものであることから傾きが負となっているが、減衰を示すものには書き直すと次のようになる。

$$y=11.623\ln(d) + 32.825 \dots \dots \dots \text{(式C)}$$

この式の対数部分は自然対数で底がeであるから、常用対数で表記されている(式B)との関連性を調べるのには都合が悪い。そこで、底の変換公式を使って(式A)を常用対数を用いたものに変換する。

$$y=11.6231 \frac{\log_{10}d}{\log_{10}e} + 32.825$$

$$= 26.76 \log_{10}d + 32.825 \dots \dots \text{(式D)}$$

周波数950MHzでは(式B)の第1項は 59.55であるから、(式D)を(式B)の形にすると、

$$\text{PathLoss} = 20\log_{10}f + 10 \times 2.676\log_{10}d - 26.7 \dots \dots \text{(式E)}$$

(式D)の右辺第3項の定数は(式B)と比較すると1.3の違いがあるが、これは近似によりy切片が移動したための結果であり、グラフの傾きを決めるのは右辺第2項であり、経路品質係数として約2.7を得る。

イ 落葉した非密生林で、なだらかな丘により見通しが遮られる場合

47ページの図5-16(a)は、丘により見通しを遮られた区間の送受信ノードアンテナ高2mの受信電力と距離の関係を表したグラフである。このグラフから近似直線(対数近似)の式を起し伝搬損失の形に書き換えると次の式を得る。

$$y=13.48\ln(d) + 26.387 \dots \dots \dots \text{(式F)}$$

以下、アと同じ手順で計算を進めると(式G)になる。

$$\text{PathLoss} = 20\log_{10}f + 10 \times 3.104\log_{10}d - 33.16 \dots \dots \text{(式G)}$$

(式D)の右辺第3項の定数は(式B)と比較すると5.16の違いがあるが、これは近似によりy切片が移動したことによるものである。グラフの傾きは与えるのは右辺第2項であるから、経路品質係数として約3.1という結果を得る。

以上の結果から、送受信アンテナ高が共に2mという条件で山間部における950MHzのパスロス計算により求めようとした場合、おおむね経路品質係数として次の数字を用いることができる。

比較的疎な落葉樹林で見通しが利く場合  $n \doteq 2.7$

比較的疎な落葉樹林で緩やかな丘により  
見通しが遮られている場合  $n \doteq 3.1$

## 第4節 機能試験

### 1 試験の概要

第4章で述べたように、山間部ではセンサーネットワークを利用した様々なアプリケーションが考えられる。そこで、それらの機能が実現可能かどうかを調べるために機能試験を行った。なお、試験は公開とし950MHz帯の実機を用いた。

#### (1) 想定アプリケーション

想定したアプリケーションは、「山間部の鳥獣生態調査」であり、山間部に生活する鳥獣に測定用センサーノードを装着した場合に、どの程度の通信範囲が確保できるかを確認する。

#### (2) システム構成

図5-31に機能試験のシステム構成図を示す。中型動物に装着することを想定したセンサーノードを人が携帯して森林を歩き回り、そこからの情報を固定したセンサーノードで受信して接続したPCで処理して位置等を表示する。

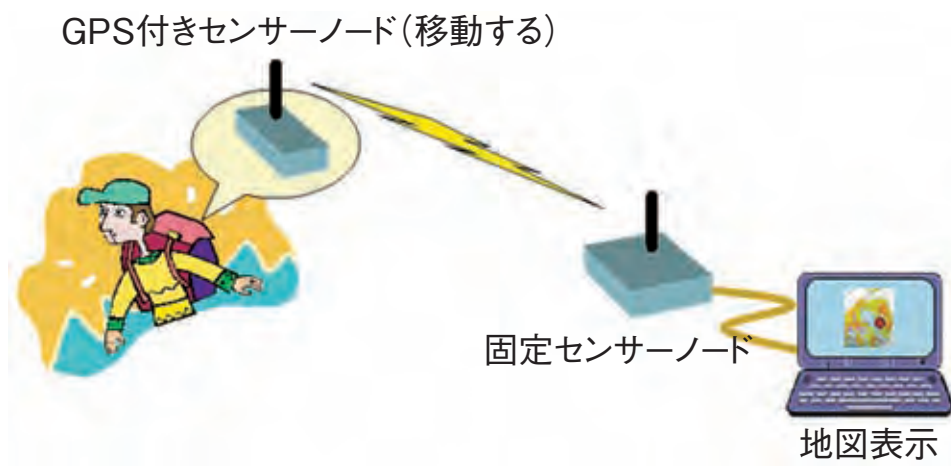


図5-31 機能試験のシステム構成図

移動するセンサーノードから送られてくる情報は、以下のとおりである。

- GPS位置データ
- 温度データ（鳥獣の体温を測定することを想定）

これらの情報をPCの地図上にマッピングして表示する。



表 5 - 10 測定に使用した装置の仕様

使用ノード	950MHz帯機能試験用ノード (OKI製)
周波数	950~956MHz
空中線電力	1mW (= 0 dBm)
空中線利得	0dBi ( $\lambda/4$ ホイップアンテナ)
受信感度	-93dBm
変調方式	FSK方式
伝送レート	90kbps



写真 5 - 9 機能試験用装置の外観 (右が移動して使用したセンサーノード、左が固定して使用したセンサーノード)

## 2 機能試験の結果

### (1) 試験の日程

試験日 平成20年12月11日（木）

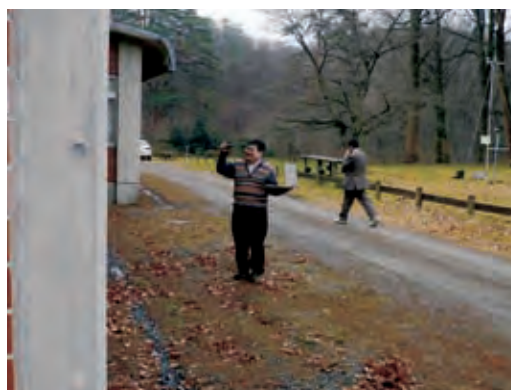
場 所 岩手大学農学部附属滝沢演習林（岩手県岩手郡滝沢村）

### (2) 試験の様子

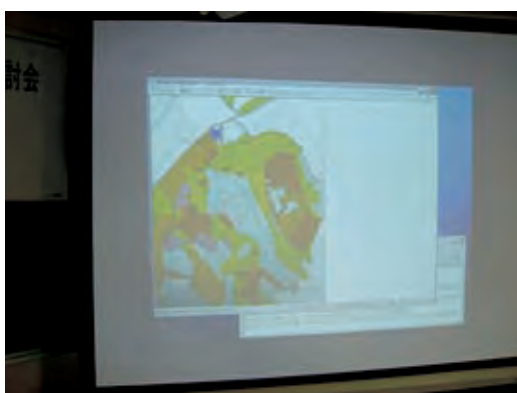
岩手大学農学部附属滝沢演習林での機能試験を実施した様子を写真5-10(a)～(c)に示す。



(a) 機能試験の概要を説明している様子



(b) 移動するセンサーノードを携帯して歩く様子（ノートPCで歩く様子を映像配信している）



(c) GPS情報を地図表示している様子

写真5-10 機能試験の様子

### (3) 試験の結果

センサーノードを携帯した人が森林を動き回り、その様子を地図上に表示することで、基本機能として鳥獣の生態調査が可能であることを確認した。特に、950MHz帯を用いることで、従来よりも広い受信範囲を実現できた。

また、機能試験を行ったことで幾つかの技術的課題も明らかになった。

#### ア センサーノードの装着

実際に鳥獣に装着するには、動物に対する負荷を軽くするために装着感を下げ、さらに小型化を図る必要がある。特にアンテナは突出部分をなくす意味から筐体内に納めるか、平面アンテナにすることが必須である。また、GPS受信モジュールを付属させる場合は、GPSデータを安定して受信するためGPSアンテナの指向方向は常に上空を向いていなければならないため、動物に装着する場所、部位（頭頂部や首の後ろなど）を考慮しなければならない。

#### イ GPSの初期受信

軌道を周回する4つの衛星からのデータを元に位置を算出するため、衛星軌道情報などの初期情報が得られるまでGPS受信機を接続したノードを静止状態にしなければならなかった。実際に鳥獣の位置情報をGPSから求めようとする場合は、この初期設定のための静止状態保持が問題となる。何らかの対策を講ずる必要がある。

#### ウ 広域ネットワーク

鳥獣の移動範囲が広い場合、広域にわたってセンサーノードを設置しておく必要があるが、広大な森林部に面的にネットワークを網羅するのはセンサー端末の個数から見て現実的ではない。行動観察範囲をある程度絞り込んでネットワークを構築するなどの工夫が必要である。

## 第5節 山間部におけるセンサー機器の使用上の留意点

### 1 電源

センサーネットワークを構成するセンサーノードは、電池駆動が基本である。一般に電池は化学反応により起電力を発生させるため、低温では能力が低下する。山間部での使用に際し、特に冬季の低温という条件を考慮する必要がある。また、頻繁に電池交換できる環境にないことが多いため長時間の寿命が要求される。以下に、代表的な電池の特性<sup>1</sup>を整理する。

#### (1) 放電特性

表5-11 様々な電池の放電特性

電池の種類	公称電圧 (V)	放電特性の概要
マンガン電池	1.5V	放電開始直後は比較的急激に電圧が低下するが、その後はなだらかに落ちていく。寿命の末期は急激に電圧が低下する。
アルカリ電池	1.5V	マンガン電池と同じ傾向を示す。但し、マンガン電池よりも長寿命で大きな電流が取れる。
ニッケル水素電池	1.2V	繰り返し充電可能な二次電池である。動作電圧は安定しているが、寿命末期には電圧の低下が著しい。
空気亜鉛電池	1.4V	放電電圧が最後まで安定している。電池の容量が他の電池に比較して小さいが、最近大容量のものも開発されつつある。
塩化チオニル・リチウム電池	3.6V	放電特性は寿命末期まで極めて安定している。動作温度範囲も広く信頼性が求められる機器に使用されることが多い。

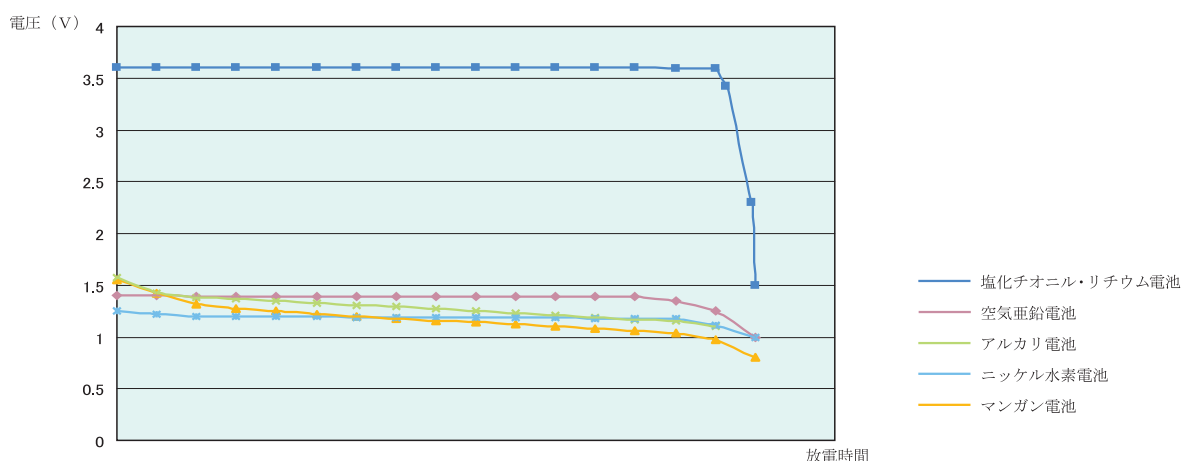


図5-32 様々な電池の放電特性

〔電池の容量は種類により異なるので放電時間は全ての種類の電池で同一座標ではない。放電開始から放電終了までの電圧の変動傾向を示すものとして理解されたい。〕

<sup>1</sup> 参考文献 トランジスタ技術 2008.6 (CQ出版社)

## (2) 温度特性

### ア マンガン電池

低温下では放電開始の早い時期から急激に電圧の低下が始まる。常温（20℃）でも高温（40℃）でも電圧の低下はアルカリ電池に比較すると大きい。

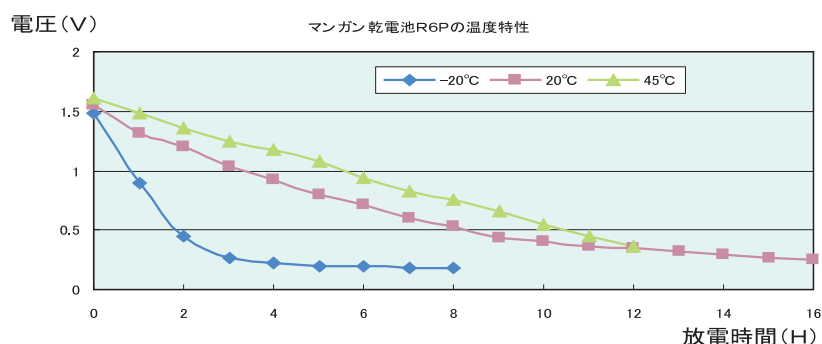


図5-33 マンガン電池の温度特性

### イ アルカリ電池

常温（20℃）、高温（40℃）時の電圧の低下は比較的なだらかであるが、低温下での電圧低下は大きい。低温状態では1ボルト前後を推移した後、急激に電圧が低下して放電能力がなくなる。

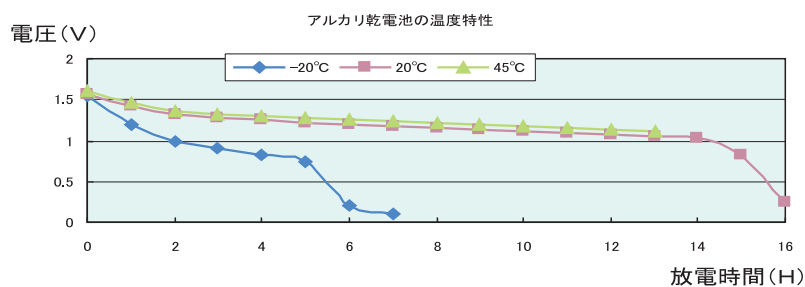


図5-34 アルカリ電池の温度特性

### (3) 自己放電特性

電池は使用しなくとも自然に放電する。センサーノードの送受信頻度が低く消費電力が小さい場合であっても自己放電率が大きいとそれだけ電池の交換時期が早くなる。

充電して繰り返し使用可能な2次電池の自己放電率は10～20%/年であり、機器に装填しなくても数ヶ月で放電してしまう。電池を交換しないで長期間使用するような環境下での二次電池使用は適さない。

表5-12 代表的な電池の自己放電特性

電池の種類	公称電圧 (V)	公称容量 (mAh)	自己放電率 (%/年)
マンガン (P) 単三	1.5	700	1～5
マンガン (PU) 単三	1.5	1000	1～5
アルカリ 単三	1.5	2000	1～5
ニッケル水素 単三	1.2	～2000	10～20
リチウム (ボタン型)	3	220	1

## 2 機器の動作温度と防水対策、耐候性

山間部においてセンサーネットワーク機器を使用する場合、機器の動作温度と防水対策に注意を払う必要がある。特に標高の高い場所での使用は冬期間の気温低下を考慮する必要がある。また、防水対策として密閉したケースにセンサーノードを格納した場合の日射による内部温度の上昇など、使用環境の変化を考慮した対策が必要である。

ケースに収納する場合は電波の透過性が良いプラスチックやアクリルなどの材質を選ばなければならない。

前章までは、山間部特有の産業、地理的条件及び情報通信基盤整備の現状並びに広域センサーネットワークの具体的なニーズとその技術及び950MHz帯の電波伝搬特性について述べてきた。

本章では、より具体的に実用化を想定したモデルを描き利活用の展望と今後の課題についてまとめるものである。

## 第1節 広域センサーネットワークのシステムモデル

センサーネットワークシステムを大別すると、センサーノードをすべて固定して配置する定点間通信と、移動するセンサーノードを固定したセンサーノードで捕捉する形態に整理できる。

第4章に記載したシステム区分で言えば、前者は「線路内落石対策システム」「道路等構造物監視システム」等が該当し、後者は「鳥獣生態調査システム」や「入山者管理システム」等が該当する。

ここでは、すべてのセンサーノードを固定して配置する形態と、移動するセンサーノードと固定したセンサーノードの双方で構成される形態を、それぞれ一つずつ仮想的なフィールドを作成してシステムのモデル化を行った。モデル化に当たっては、第5章でまとめた電波伝搬特性等の結果を反映し可能な限り具体的な記述とした。

### 1 モデルⅠ 「防災行政無線と結びつけた地滑り警報システム」

モデルシステムを構築するに当たり、図6-1のとおり地滑り災害の危険性がある山村を想定して検討を行う。

#### (1) システムの概要

ア 地滑りのおそれのある急斜面や道路沿いに地滑りセンサーと雨量計を繋いだノードを配置する。

イ センサーネットワークは防災行政無線網と接続する。これにより、センサーで検知した情報は町役場分所、消防署などに伝送される。また、地滑りの危険性が高くなった場合には、防災行政無線の屋外スピーカーで注意を呼びかけることも可能である。

#### (2) 本システムのメリット

ア センサーを配置した場所を有線で接続する必要がない。

イ テレメーター固定局回線で構成するよりも安価である。(テレメーター固定局は数十万円～百万円/1局、センサーノードは2～5万円/1個(いずれもセンサー部を除く)) また、無線局の免許が不要である。



ウ 商用電源を必要としない。

エ アドホック機能により最適な通信路が即時に形成されるため、観測ポイントを必要に応じて適宜追加できる。

### (3) システムの基本設計

#### ア 使用周波数

電波伝搬試験の結果から、山間部において電波伝搬特性が2.4GHz帯よりも優位である950MHz帯のセンサーノードを使用する。

#### イ センサーノードの配置

本システムのように固定したセンサーノードを配置してネットワークを組み立てる場合は、縦横に配置するメッシュ型よりもツリー型が効率的である。見通しの良い尾根伝いの場所に出力10mWのセンサーノードを配置して基幹の通信路を作り、各測定点への枝回線は稼働時間の長い出力1mWの装置を配置する。出力10mWのセンサーノード間の距離は、第5章の考察を受けておおむね200mとし出力1mWのセンサーノードの電波の到達距離を約50mとして設計する。

#### ウ 防災行政無線（同報系）との接続点

広域センサーネットワークと防災行政無線（同報系）の接続点は、同報子局（双方向性のあるデジタル方式又はアナログ方式のアンサーバック機能付きを想定）とする。ここにはデータ引き渡しのためインターフェースが必要となる。

#### エ 利用可能なセンサーの種類とその機能

センサーノードに接続するセンサーとして考えられるものを表6-1に示す。なお、雨量計については図6-1の仮想山村の範囲（一辺が1km程度）での降雨を考えた場合、どの場所でも降雨量に大きな違いはないと考えられることから、すべてのセンサーノードに取り付ける必要はない。

表6-1 地滑り警報システムで使用するセンサー例

接続するセンサーの種類	機能・応用アイデア
雨量計	雨量を電気信号に変換してノードに出力する。
傾斜センサー	地面に埋め込んで使用する。規定量以上の傾斜を感知した場合にセンサーノードに信号を出力する。
光センサー	土砂崩れの危険性がある場所に鏡を設置し、センサーノードのある場所から光を発射してこの鏡に反射させる。光センサーでこの光を感知しモニタリングする。鏡の位置や角度に変化が生じ反射光がセンサーに届かなくなれば「異常」と判断する。

### オ センサーノードの送信時間と回数

平時には、各ノードが故障無く正常に動作していることを示す信号を毎日1回予め設定した時間に送出するものとし、また、傾斜センサー又は光センサーで災害の前触れとなるような状況を検知した場合には、直ちにそのデータを送信するものとする。



図6-1 仮想山村に構築した地滑り警報システム

### カ センサーノード電池の寿命

センサーノードの消費電力は使用している半導体の種類や通信プロトコルにより大きく異なるが、図6-2に示すように待機状態、wakeup状態、センシング状態及び送受信状態によって大きく変動する。センサーノードの電池寿命はこれらの状態の組み合わせと使用電池の容量、さらに環境温度により左右される。

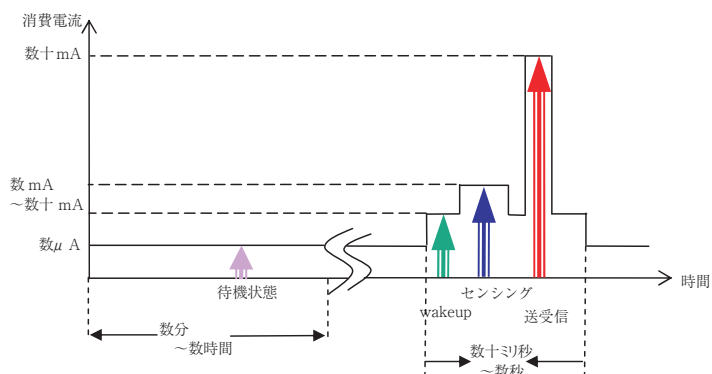


図6-2 センサーノードの消費電流

ネットワークの末端に配置するセンサーノードにおいて、例えば、平時では一日の中で23時間59分は待機状態で送受信は1分間行うものとする、標準的な出力10mWのセンサーノードでは、待機状態の消費電流は8  $\mu$ A程度であり、wakeupから送受信終了までの間の平均消費電流を70mAと仮定すると、装置の消費電流は次のように計算できる。

(待機状態)

$$8 \times 10^{-3} \text{ (mA)} \times 23.983333 \text{ (h)} \doteq 0.1918666 \text{ (mAh)} \quad (\text{式1})$$

(wakeup～送受信終了状態)

$$70 \text{ (mA)} \times 60/3600 \text{ (h)} \doteq 1.1666666 \text{ (mAh)} \quad (\text{式2})$$

(式1)と(式2)を加えたものが平時におけるセンサーノードの1日当たりの合計消費電流で、約1.358mAhとなる。アルカリ単三電池(容量2,000mAh)では計算上1,472日(約4年)間稼働することになる。しかし、実際には乾電池の電極の腐食や第5章第5節で述べたように自己放電作用があり、さらに低温環境下での劣化も重なり実用的なセンサーノードの電池交換サイクルは最長でも2～3年と考える。乾電池以外の選択肢としては、日当たりの良い場所での太陽電池パネルや小型風力発電装置と二次電池の併用も有望である。

なお、図6-1のノード(A)～ノード(C)は通信路が枝分かれする場所であり、他の10mWセンサーノードに比べて中継頻度が高いので電池の消費は激しい。

#### キ センサーノードの設置方法

100～200mの到達距離を確保するためにはセンサーノードは地上1～2mの高さに設置する必要がある。さらに、降雪量の多い地域では冬季の平均的な積雪量に見合う分のかさ上げが必要となる。台座などに電波の透過損失の少ない材料で作った収納箱を設け、この中にセンサーノードを収容する方法が一般的であるが、センサー部分とセンサーノード部分が一体となる機器では樹木に取り付けることも可能である。この場合は、伝搬試験で明らかになったとおり、樹木の幹は電波の透過性が悪いので取付け位置に注意する必要がある。また、樹木に取り付ける場合は、関係機関の許可の要否など事前の手続きに注意する。

#### ク 防災行政無線(同報系)との接続

本システムでは広域センサーネットワークを既存の防災行政無線の同報子局に接続することを考えているが、双方の接続点はセンサーノードに近い最寄りの防災行政用固定局である。ここにはデータ引き渡しのためインターフェースが必要となる。

#### (4) さらなる応用例

大雨等による地滑り以外でも、例えば、平成20年6月に発生した「平成20年岩手・宮城内陸地震」のようなケースでは、より早く住民に情報を伝えることが可能であり、被害を少なくできると考える。



## 2 モデルⅡ 「アドホック・マルチホップネットワークで実現する動物生態調査システム」

図6-3のような南北約6 km、東西約8 km程度の仮想山地を想定してモデルを設計する。目標となる動物の位置情報は広域センサーネットワークを利用して観測小屋に設置したサーバまで伝達する。ここに蓄えた情報をパソコンで処理することで動物の行動パターンや生息密度などを調べることができる。

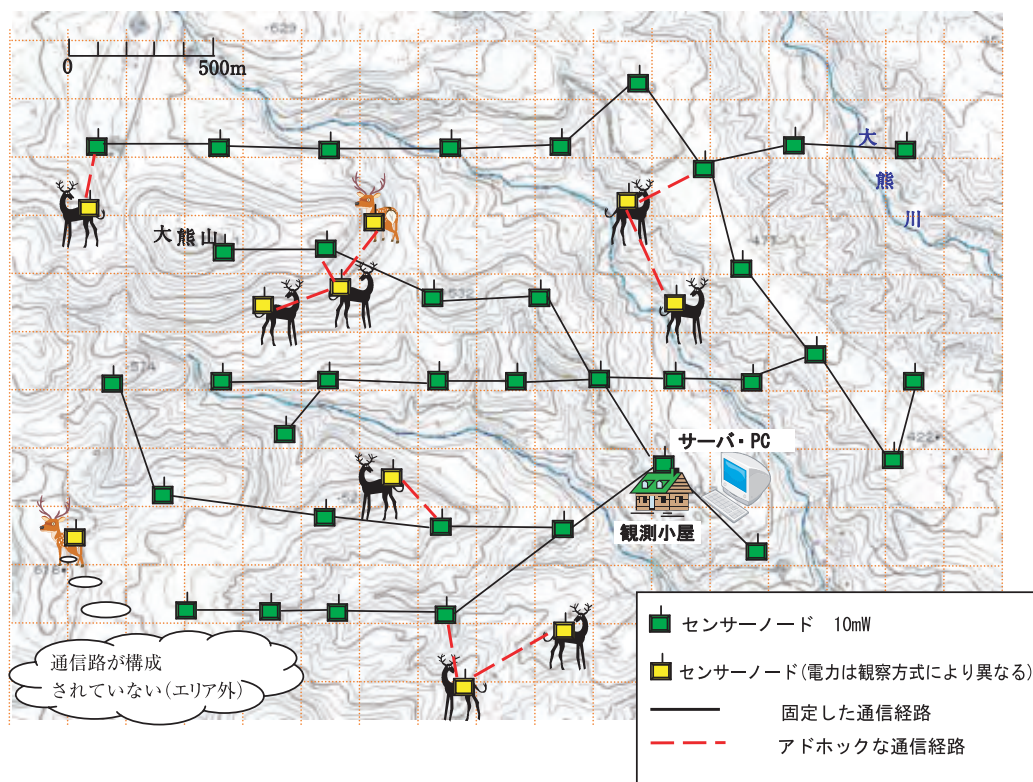


図6-3 動物生態調査システム

### (1) システムの概要

- ア 調査対象の動物を捕獲して、動物装着用に改修された小型軽量のセンサーノードを装着する。
- イ 動物の位置情報は緯度経度で表示するのではなく、固定配置されたセンサーノードの場所から推定する方式とする。このため、固定配置するすべてのセンサーノード及び動物に取り付けるすべてのセンサーノードに予め個別IDを割り当てる。また、マルチホップ転送の経路が分かるようにネットワークレイヤで経路を覚えることができるプロトコルを設定する。
- ウ 観測データはリアルタイムに取得する必要はなく、日単位のデータを集積し分析することで位置を特定しようとするものである。

エ 観測小屋にあるサーバに、動物に取り付けたセンサーノードと通信した固定センサーノードのIDと動物に取り付けたセンサーノードのID及び通信時刻データを蓄積し、これらの情報をパソコンで処理することにより各個体の移動の様子が分かるようにする。

(2) 本システムのメリット

ア 調査区域内のいかなる場所に目標となる動物がいても、リアルタイムでこれを捕捉できるようにするためには、区域全体が通信可能エリアとなるようにセンサーノードを縦横に敷き詰めなければならない。

しかし、本システムではリアルタイムで位置情報を得る必要がないため、動物が固定したセンサーノードとアクセスできる場所にいる時だけ通信できる方式とした。このようにすることで、センサーノードの数を大幅に減らすことができる。

イ センサーノードを取り付けた動物の数が多いほど、アドホックな通信路が構成される機会が多くなることからデータの取得率が上がる。

ウ これまでのようなVHF帯の発振器を動物に取り付けて追尾を行う方式では、追跡する人間が八木アンテナ等の指向性アンテナを携帯して山を歩き回らなければならなかったが、本システムを利用することにより観測小屋で集中的にその動向が把握できる。

(3) システムの基本設計

ア 通信経路の構成

本システムは動物に取り付けたセンサーノードを捕捉し観測小屋まで導くための固定通信経路と、動物に取り付けたセンサーノードが構成要素となるアドホック（自律分散型）なネットワークとの融合により実現する。ネットワーク構成としては、スター型のトポロジとメッシュ型のトポロジを融合したクラスタツリー構造のネットワークをとる。

イ 固定配置したセンサーノードの通信路

山の頂きや尾根伝いの互いに見通せるような場所を選んで950MHz帯出力10mWのセンサーノードを300~500m毎にツリー状に配置する。見通し内伝搬とならないような区間はセンサーノード間の距離を100m~200m程度に縮めて配置する。

ウ 動物に取り付けるセンサーノードの送信頻度

動物に取り付けるセンサーノードの送信頻度は当該動物の平均的な移動速度と観測者が必要とするデータの間隔から適当な値を決定する。一日の移動距離が数100m程度で観測者が週単位での位置データで可とする場合は、長時間の稼働を考慮して1日4~5回程度の送信で対応できるものとする。動物の移動範囲が広く送信頻度が多い程、アドホック通信路が構成される確率が上がる。

エ 動物に取り付けるセンサーノードの送信電力

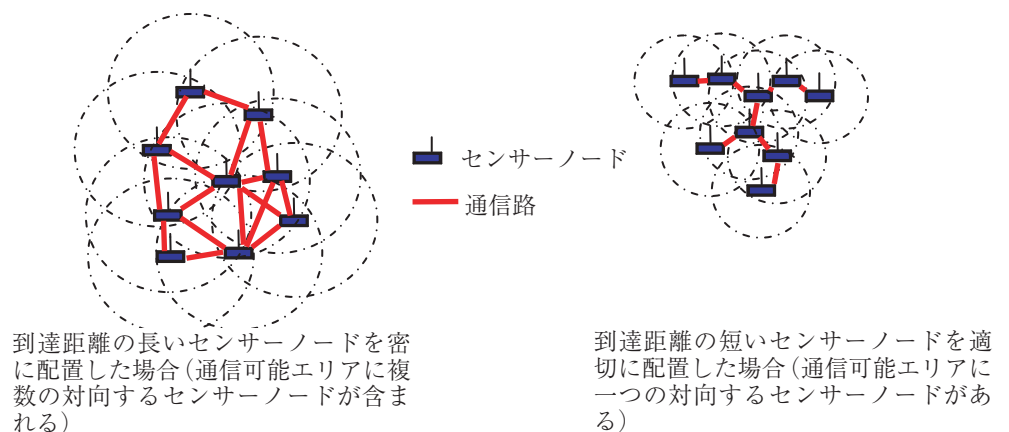
ウにより決定された送信頻度及びセンサーノードを装着した動物の数から送信電力を決める。送信頻度が低く、移動するセンサーノードの数が少ない場合は、他のセンサーノードにアクセスできる確率が下がるので、より大きな送信電力を必要とする。

オ センサーノードの数に関するトレードオフ

ネットワークに配置するセンサーノードの総数及び配置密度は、通信状態や稼働寿命に影響する。通信状態には同一ネットワークで同時に稼働するセンサーノードの数とその配置密度に左右される幾つかの要素があり、それらは互いにトレードオフの関係にある。したがって、最適なセンサーノードの配置数や分布方法は単純に算出できるものではなく、最重視するものと妥協できるものを双方考慮して決定しなければならない。(表6-2、図6-4参照)

表6-2 センサーノードの数や密度の違いによる問題点等

稼働センサーの数と密度	結果として発生する現象	対応策
少ない場合	センサーノード間の距離が遠くなり、結果としてエラーレートが高くなる。	伝送レートを下げるか何度もデータを繰り返し伝送する。
	送信電力を大きくしなければならず、その結果センサーノードの稼働時間(電池寿命)が短くなる。	電池の容量を増す。
	センシングできる範囲が狭くなる。また、センシングデータが間欠的になりデータの取得数が減る。	長期間のデータ取得を行い、統計的手法や数学的処理を施して補完する。
多い場合	不必要なセンサーノードも稼働状態になる場合があるので電力が無駄になる。その結果、センサーノードの稼働時間(電池寿命)が短くなる。	電池の容量を増す。
	センサーノード同士の干渉が多くなり通信が輻輳する。その結果、エラーレートが高くなる。	伝送レートを下げるか何度もデータを繰り返し伝送する。



到達距離の長いセンサーノードを密に配置すると、通信エリア内にある複数のセンサーノードが呼応し互いに干渉する。一方、通信エリアを適切に選ぶとエリア内にあるセンサーノードは互いに干渉しない。

図6-4 通信可能範囲と配置するセンサーノードの数を適正化するとセンサーノード相互の干渉が減る

#### (4) さらなる応用例

動物の生態調査だけでなく鳥獣が人身や農産物に被害をもたらす場合の対策としての応用も可能なシステムである。

## 第2節 山間部における広域センサーネットワークの構築に関する今後の課題

### 1 広域センサーネットワークと他の通信網との接続

山間部における広域センサーネットワークを利用したアプリケーションは、インターネット、携帯電話、業務用無線など他の通信網と接続することにより応用範囲が一層広がる。

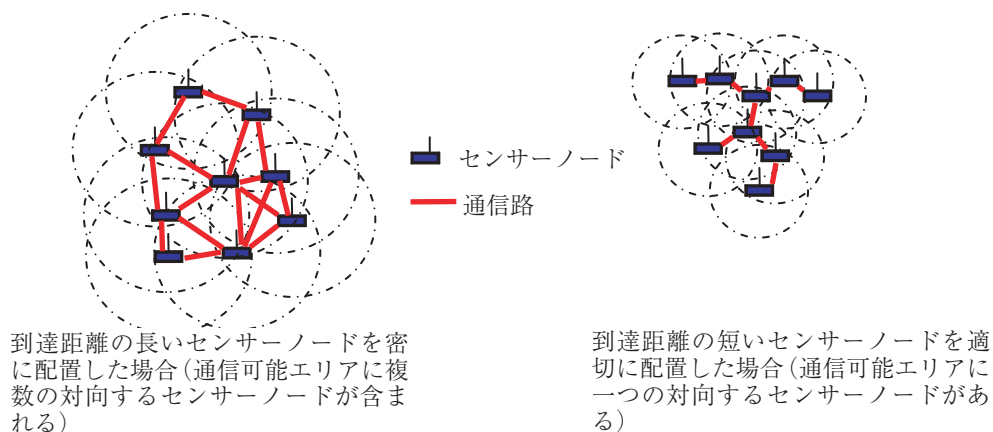
### 2 技術的課題

950MHz帯のセンサーノードについては、平成20年5月に電波の割当がなされたばかりということもあり、未だ本格的な量産体制には入っていない。また、これまで主に工場や事務所などで使用されてきた2.4GHz帯のZigBeeについても専ら屋内での使用であったことから、山間部での利用を考えた場合に新たに解決されなければならない課題が浮上する。

#### (1) 屋外使用

第一に問題となるのは耐候性である。長期間安定に動作させるためには筐体の強化と温度変化に対する安定性が重要である。山間部では特に低温でも性能が落ちないリチウム電池とするなどの対策が必要である。





到達距離の長いセンサーノードを密に配置すると、通信エリア内にある複数のセンサーノードが呼応し互いに干渉する。一方、通信エリアを適切に選ぶとエリア内にあるセンサーノードは互いに干渉しない。

図6-4 通信可能範囲と配置するセンサーノードの数を適正化するとセンサーノード相互の干渉が減る

#### (4) さらなる応用例

動物の生態調査だけでなく鳥獣が人身や農産物に被害をもたらす場合の対策としての応用も可能なシステムである。

## 第2節 山間部における広域センサーネットワークの構築に関する今後の課題

### 1 広域センサーネットワークと他の通信網との接続

山間部における広域センサーネットワークを利用したアプリケーションは、インターネット、携帯電話、業務用無線など他の通信網と接続することにより応用範囲が一層広がる。

### 2 技術的課題

950MHz帯のセンサーノードについては、平成20年5月に電波の割当がなされたばかりということもあり、未だ本格的な量産体制には入っていない。また、これまで主に工場や事務所などで使用されてきた2.4GHz帯のZigBeeについても専ら屋内での使用であったことから、山間部での利用を考えた場合に新たに解決されなければならない課題が浮上する。

#### (1) 屋外使用

第一に問題となるのは耐候性である。長期間安定に動作させるためには筐体の強化と温度変化に対する安定性が重要である。山間部では特に低温でも性能が落ちないリチウム電池とするなどの対策が必要である。

## (2) 形状

センサーノード基板は500円硬貨程度まで小型化されているが、機器全体としては電池の容積等の関係で名刺大の大きさとなっている。また、アンテナが突起物となっているので、動物に取り付けるような使い方では改良や工夫が必要である。

## (3) センサー

センサーノードには目的に応じて様々なセンサーが接続できるが、接続方式に関する規格の統一がなされていない。このため、装置の種類や製品によっては専用のインターフェースが必要となる。センサーノードに接続するためのハード及びソフトウェアの統一規格が定められることを期待する。

## (4) 省電力化

センサーノードは、高周波無線回路（RF）と物理層・MAC層の通信プロトコルを扱う回路のワンチップ化、使用半導体のCMOS<sup>1</sup>化、及びソフトウェア的な通信制御（装置のスリープ、スタンバイ、間欠動作等）などの技術により、現在でもかなり省電力化が進んでいる。

一方、センサーには原理的に大きな電力を必要とするものもあり、センサーノードと同一電源から電力を供給する場合には、センサーの消費電力がセンサーノードの稼働時間を引き下げてしまうので、センサーの省電力化も図らなければならない。位置情報や時刻を得るためセンサーノードに接続するGPS受信モジュールなどは比較的大きな電力を必要とする例の一つである。

## (5) セキュリティ

第三者がネットワークに悪意を持って侵入し、センシングデータを改ざんし、盗視する可能性もある。通信ネットワークには有無線を問わずセキュリティ対策が必要である。また、山間部での利用は工場や事務所といった管理された領域ではないのでセンサーノードやセンサーの盗難についても策を講ずる必要がある。

## (6) センサーノードのアンテナ

人体や動物にセンサーノードを取り付けて使用する場合、その体位によりアンテナの角度が変化するため電波の強さが大きく変動してしまう。どのような状態でも電波の強さが一定となるようなアンテナの開発が求められる。

---

<sup>1</sup> Complementary Metal Oxide Semiconductor（金属酸化膜半導体素子）現在の集積回路の主流であり、一般に消費電力が小さい。

### 3 普及のための課題

#### (1) 価格（センサーを含む）

現在の参考価格は図6-5に示すようなセットで20万円～30万円程度であり、小規模のシステムを構築する場合は手軽な金額といえる。しかし、多数のセンサーノードを配置するようなシステムではマルチホップ用センサーノード一個当たりの価格が2万円～5万円であり設備費が高んでしまう。一層の低価格化が望まれる。

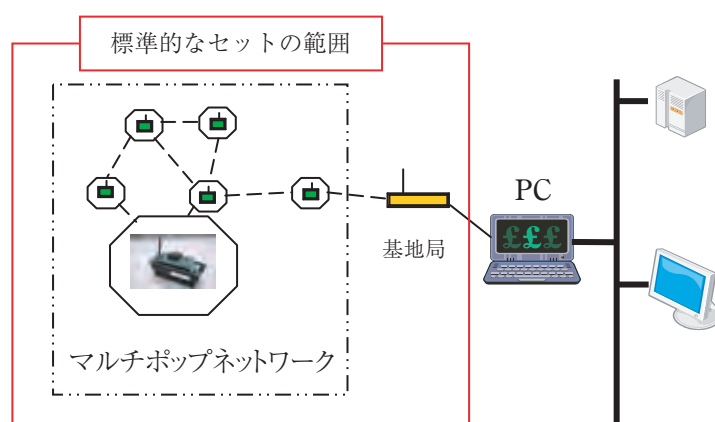


図6-5 標準的なセット例

表6-2 セットに含まれる装置

セットに含まれる機器	個数	説明
センサーノード(2.4GHz帯)	6	温度、湿度、気圧、光、軸加速度センサー程度のものが付属
基地局(2.4GHz帯)	1	USBでパソコン接続
汎用外部センサー基盤	1	アナログセンサ端子10、デジタル端子6、電源等を実装
インターフェースカード	1	パソコンと接続するために使用
付属品・ソフトウェア	1	CD-ROM、ケーブル類一式
セット価格	20万円～30万円（規格やメーカーにより違いあり）	

#### (2) 認知度

センサーノードやセンサーネットワークという言葉は、一般の人々にとってまだまだ馴染みが薄い。幅広い普及が価格低下を促し、さらに新たなニーズの創出に結びつくものと考えられる。そのためには、企業などの従来からのクライアントだけではなく、新しいユーザーとなる得る農家や養殖漁業者、さらに学術関係者や自治体などにその有用性を理解してもらう必要がある。

### 第3節 今後の展望

東北地方の冬は寒さが厳しく雪も多い。また、盆地では夏の気温が摂氏40度前後に上がることもしばしばあり、寒暖の差が大きい地域である。また、山間部は溪谷、河川、湖、池など、変化に満ちた様相を呈している。

今回の調査検討では、このような環境下で950MHz帯と2.4GHz帯において、山間部特有の様々な条件を設定して電波伝搬状況の比較測定を行った。その結果、起伏に富み樹木の茂る条件、あるいは、積雪のある環境下でも950MHz帯は2.4GHz帯の電波よりも到達距離が長いことが分かった。このことは建物や障害物の多い都市部においても有効であることを裏付けるもので、また、様々なユーザーで過密状態にあるISMバンド<sup>1</sup>以外の選択肢を得たことになる。

センサーノード同士の干渉や混信を避けるためには送信電力と使用周波数帯を適切に選ばなくてはならない。電波の到達距離は必ずしも長い程良いというものではないが、「より遠くまで」「センサーノードの数を減らしたい」と希望するユーザーにとって、950MHz帯の新規割当は非常に喜ばしいことである。

さて、第4章では、山間部における広域センサーネットワークのモデルシステム例として6つのアプリケーションを提示したが、山間部以外での利活用についても様々なアイデアが考えられる。例えば、湾内の養殖筏への設置、河川管理、ホームセキュリティ、公園や遊園地の管理などへの応用など、利用できる分野は無限にあるといっても過言ではない。

また、センサーネットワーク技術により集められた情報は、インターネットや携帯電話等の他の通信網と接続することにより、一層のグローバル化が図られ、応用範囲も飛躍的に拡大する。さらに、センシングデータは集約されるだけでなく、これらの情報を基に他の機器を自動的に制御することも可能であり、能動的な活用も期待される。

広域センサーネットワークを構築する際には、当然ながらコストを意識した効率的なセンサーノードの配置が求められる。本検討会では、情報通信基盤の整っていない山間部が抱える課題解決のためのソリューションの一つとして検討してきたが、市街地など既に情報通信基盤が整備されている場合であっても、電源の配線が不要で自由にネットワーク化が図れ、加えて低コストであるということであれば、センサーネットワークはさらに魅力的なものとして発展することであろう。

1 産業科学医療用周波数帯

## 開催要綱

### 1 名称

本検討会は、「山間部における広域センサーネットワークの構築に関する調査検討会」（以下、「検討会」という。）と称する。

### 2 目的

地方山間部でセンサーネットワークを利用するためには、携帯パケット網が利用できない地域が存在することから、広域かつ多種のセンサー情報を総合的に利用できるシステムの構築が考えられる。

本調査検討会では、地方山間部におけるニーズを背景とした最適なセンサーネットワークを構築するために、新しい無線利用システムであるアクティブ系小電力無線システムについての電波伝搬特性調査を行うとともに、当該ネットワークの構築に当たっての地形及び気象などの自然環境条件の変化等を考慮した技術的パラメータの検討を行う。

また、当該ネットワークシステムの有効性評価及び利活用方策についての検討を行うとともに、実用化に向けた提言を行うこととする。

### 3 調査検討事項

- (1) 山間部における各種センシングニーズに対応した総合的なシステムの検討
- (2) システムの検討に基づくフィールド試験の実施及びシステムの有効性の評価
- (3) 山間部における広域センサーネットワーク構築及び実用化に向けた課題と方策
- (4) その他関連する事項

### 4 構成

- (1) 検討会は、東北総合通信局長の委嘱を受けた委員により構成する。
- (2) 検討会には、構成員の互選により座長を置く。
- (3) 検討会には、作業部会を置く。作業部会の構成員は検討会で定める。
- (4) 作業部会には主査を置き、座長が指名する。

### 5 運営

- (1) 検討会は座長が開催し主宰する。
- (2) 座長は必要に応じて、構成員以外の委員を招聘することができる。
- (3) その他、運営に関する事項は検討会において定める。

### 6 開催期間

設置の日から平成21年3月31日までとする。

### 7 その他

検討会の事務局は、東北総合通信局無線通信部企画調整課に置く。

## 資料2 山間部における広域センサーネットワークの構築に関する調査検討会

### 構 成 員

<12名／五十音順:敬称略>

あお い とし き  
青井 俊樹

岩手大学 環境科学系農学部共生環境課程専任担当 教授

いわ や ひで つぐ  
岩屋 秀嗣

株式会社共和電業 営業本部 新事業推進室長

うめ だ とも あき  
梅田 智章

株式会社日立プラントテクノロジー 社会・産業システム事業本部  
機械電機システム事業部 電機・制御統括部 機械制御システム部  
部長

こし ざわ とも あき  
腰沢 智昭

大井電気株式会社 東北支社 営業担当

◎ さわ もと じゅん  
澤本 潤

岩手県立大学 ソフトウェア情報学部 教授

せ がわ のり ひさ  
瀬川 典久

岩手県立大学 ソフトウェア情報学部 講師

たか せ りき お  
高瀬 力男

東日本旅客鉄道株式会社 盛岡支社 設備部 施設課  
線路技術グループ 副課長

たち ぼな よし たか  
立花 良孝

岩手県 環境生活部 自然保護課 総括課長

なか むら かつ よし  
中村 勝義

岩手県 農林水産部 森林整備課 整備担当課長

ほり きり ひろ のり  
堀切 弘徳

遠野市 産業振興部 農林振興課 課長

ふく なが しげる  
福永 茂

沖電気工業株式会社 センサネットワークベンチャーユニット  
マネージャー

そ ね ゆたか  
曾根 裕

東北総合通信局 無線通信部長

(◎は座長)



### 作業部会設置要綱

#### 1 目的

本作業部会は、「山間部における広域センサーネットワークの構築に関する調査検討会」（以下「検討会」という。）における審議を円滑・効率的に進めるため、検討会の指示等に基づき必要な作業を行う。

#### 2 主な任務

- (1) 山間部のセンシングニーズの整理
- (2) センシングニーズに基づく有効かつ実用的な電波利用システムの検討
- (3) フィールド試験の内容・システム・試験方法の検討、試験結果の分析・整理
- (4) 報告書の構成・内容検討、執筆・作成
- (5) 検討会から指示・委託された作業、その他必要な事項

#### 3 構成員

- (1) 構成員（作業部会委員）は別紙のとおりとする。ただし、主査が必要と認める場合は、検討会の承認を受けて、構成員の追加等を行うことができる。
- (2) 作業部会の主査は、検討会座長が指名する。

#### 4 運営等

- (1) 主査は作業部会を主宰する。
- (2) 作業部会の審議において主査が必要と認める場合は随時、説明員を招聘することができる。
- (3) 作業部会委員は、主査の了解の下に、必要な者を作業部会に出席させることができる。
- (4) 作業部会は、会合開催によるほか、効率的運営を図るため電子メール等の通信手段を利用した意見交換等でも実施できることとする。
- (5) 作業部会の事務局は、東北総合通信局無線通信部企画調整課に置く。



## 資料 4 山間部における広域センサーネットワークの構築に関する調査検討会

### 作業部構成会員

< 8名 / 五十音順:敬称略 >

いとう つとむ  
伊藤 方

株式会社日立プラントテクノロジー 研究開発本部土浦研究所  
第二部 主任研究員

いわや ひでつぐ  
岩屋 秀嗣

株式会社共和電業 営業本部 新事業推進室長

おいかわ あきひろ  
及川 明宏

岩手県 農林水産部 森林整備課 主査

せがわ のりひさ  
○ 瀬川 典久

岩手県立大学 ソフトウェア情報学部 講師

まつばら かずえい  
松原 和衛

岩手大学 動物医科学系農学部動物科学課程専任担当 准教授

ふくなが しげる  
福永 茂

沖電気工業株式会社 センサネットワークベンチャーユニット  
マネージャー

やまうち きよし  
山内 貴義

岩手県 環境保健研究センター 地球科学部 専門研究員

さとう としき  
佐藤 敏樹

東北総合通信局 無線通信部 企画調整課長

(○は主査)

## 資料 5 山間部における広域センサーネットワークの構築に関する調査検討会

### 審 議 状 況

時 期	項 目	項目の詳細
平成20年7月1日	第1回検討会の開催	1 作業部会の設置 2 調査検討スケジュール 3 ニーズ及び関連技術紹介 (1) 野生動物の行動・生息実態調査の概況と、近年の課題 -クマを一例として- (2) 岩手の森林・林業概要 (3) センサーネットワークと950MHzのご紹介 4 調査検討事項の詳細 場所：盛岡市 いわて県民情報交流センター 7階 (岩手県立大学 アイーナキャンパス 学習室1)
7月25日	メールによる意見照会 (検討会)	1 第1回検討会の議事録
7月30日	第1回作業部会の開催	1 山間部における各種センシングニーズに対応した総合的なシステムの検討 2 フィールド試験方法の検討 (電波伝搬等基礎試験のみ) 3 作業部会の今後のスケジュールの確認 場所：盛岡市 いわて県民情報交流センター 7階 (岩手県立大学 アイーナキャンパス 学習室3)
8月7日	メールによる意見照会 (作業部会)	1 第1回作業部会の議事録
8月22日	メールによる意見照会 (作業部会)	1 試験企画書
8月25日	メールによる意見照会 (作業部会)	センシングニーズに基づいた有効なセンサーネットワークシステムの検討 1 鳥獣被害対策システム 2 鳥獣生態調査システム 3 道路等構造物監視システム
8月28日	メールによる意見照会 (検討会)	1 試験企画書
9月1日	第2回作業部会の開催	1 試験企画書 等の検討 場所：盛岡市 いわて県民情報交流センター 7階 (岩手県立大学 アイーナキャンパス 学習室1)
同上	第2回検討会の開催	1 試験企画書 等の検討

時 期	項 目	項目の詳細
9月11日	メールによる意見照会 (作業部会)	1 第2回作業部会の議事録
同上	メールによる意見照会 (検討会)	1 第2回検討会の議事録
9月18日	メールによる報告 (作業部会)	1 試験企画書 (保留事項の整理、測定電力)
同上	メールによる報告 (検討会)	1 試験企画書 (保留事項の整理、測定電力)
11月 6日	電波伝搬試験	1 平地における見通し内の伝搬特性試験 場所：埼玉県川口市
12月 8日 ～12月10日	電波伝搬試験	1 森林における見通し外の伝搬特性試験 場所：岩手県岩手郡滝沢村 岩手大学 滝沢演習林
12月11日	公開機能試験	1 公開機能試験 2 パネル・センサー機器等の展示 場所：岩手県岩手郡滝沢村 岩手大学 滝沢演習林
平成21年 1月29日 ～1月30日	電波伝搬試験	1 森林における積雪時の伝搬特性試験 場所：岩手県岩手郡滝沢村 岩手大学 滝沢演習林
1月28日	メールによる意見照会 (検討会・作業部会)	1 調査検討報告書の構成(目次)
2月19日	第3回検討会・ 第3回作業部会 (合同)の開催	1 電波伝搬等試験の実施結果 2 調査検討報告書(第1章～第4章) 場所：仙台市 東北総合通信局 12階会議室
3月 3日	メールによる意見照会 (検討会・作業部会)	1 第3回検討会・第3回作業部会 (合同)の議事録
3月10日	第4回検討会・ 第4回作業部会 (合同)の開催	1 調査検討報告書(第5章～第6章) 場所：盛岡市 いわて県民情報交流センター 7階 (岩手県立大学アイーナキャンパス 学習室1)

## 資料6 フィールド試験で取得したデータ

### 電波伝搬試験データ（空中線利得等補正後）

#### 1 平坦地見通しでの測定（荒川河川敷）

送信ノード空中線高 (m) 0.5		
距離 (m)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz
1	-34.4097	-66.1179
2	-48.5748	-72.1527
4	-57.1847	-70.0889
8	-52.7147	-75.0788
16	-64.631	-81.1697
32	-84.1799	-77.7765
64	-74.134	-86.9876
128	-80.1925	

送信ノード空中線高 (m) 2		
距離 (m)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz
1	-37.1521	-48.0242
2	-49.6867	-54.2143
4	-53.4474	-62.498
8	-50.6496	-69.3784
16	-58.9529	-77.2753
32	-64.3728	-87.1927
64	-68.1826	-90.2384
128	-76.9692	-89.7683
256	-90.4107	

#### 2 積雪無・木々があり比較的平坦な場所での測定（岩手大学農学部附属滝沢演習林）

送信ノード空中線高 (m) 2		
距離 (m)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz
1	-34.4097	-66.1179
2	-48.5748	-72.1527
4	-57.1847	-70.0889
8	-52.7147	-75.0788
16	-64.631	-81.1697
32	-84.1799	-77.7765
64	-74.134	-86.9876
100	-80.1925	

送信ノード空中線高 (m) 0.5		
距離 (m)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz
1	-49.5877	-69.0335
2	-42.8382	-81.8413
4	-59.0056	-63.3605
8	-64.7518	-66.008
16	-67.0749	-76.6324
32	-78.506	-92.4303
64	-80.4441	

送信ノード空中線高 (m) 0		
距離 (m)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz
1	-43.745	-72.7987
2	-43.168	-70.316
4	-48.8696	-65.8632
8	-60.511	-70.4306
16	-68.9253	-91.6967
32	-78.5228	-93.221
64	-87.7699	

### 3 積雪無・丘越えでの測定（岩手大学農学部附属滝沢演習林）

送信ノード空中線高 (m) 2			送信ノード空中線高 (m) 0.5			送信ノード空中線高 (m) 0		
距離 (m)	受信電力 (dBm)		距離 (m)	受信電力 (dBm)		距離 (m)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz		950MHz	2.4GHz		950MHz	2.4GHz
1	-31.8171	-41	1	-38.7142	-66.9704	1	-43.1824	-72.4104
2	-35.2345	-53.6811	2	-42.8273	-53.5552	2	-49.2665	-60.0869
4	-42.6024	-62.334	4	-49.3302	-60.507	4	-56.0197	-60.0098
8	-52.9257	-63.4812	8	-48.5617	-63.4209	8	-62.5322	-63.966
16	-56.258	-71.4676	16	-62.5137	-75.933	16	-75.1733	-89.9699
32	-72.9758	-90.7401	32	-79.9053		32	-85.7744	
50	-78.8325		48	-78.8707		72	-88.8874	
64	-86.4597		72	-84.1072				
72	-87.1004		88	-86.8296				
80	-85.3511							

### 4 手で遮断しての測定（岩手大学農学部附属滝沢演習林）

送信ノード空中線高 (m) 2			送信ノード空中線高 (m) 0.5			送信ノード空中線高 (m) 0		
距離 (m)	受信電力 (dBm)		距離 (m)	受信電力 (dBm)		距離 (m)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz		950MHz	2.4GHz		950MHz	2.4GHz
1	-48.5583	-59.1713	1	-44.4432	-70.7866	1	-55.674	-66.2449
2	-57.9584	-69.0643	2	-42.512	-81.1008	2	-43.746	-79.0867
4	-60.0873	-77.9174	4	-50.1768	-73.9209	4	-50.6999	-74.1406
8	-65.4093	-76.6692	8	-56.601	-69.61	8	-61.025	-88.7706
16	-64.7954	-80.0062	16	-64.5811	-80.1251	16	-70.2503	
32	-78.8005		32	-70.7007		32	-87.2876	
64	-79.8344	-92.9896	64	-79.8089		64	-87.3533	
100	-85.9163							
128	-87.7356							

## 5 積雪有・木々があり比較的平坦な場所での測定（岩手大学農学部附属滝沢演習林）

送信ノード空中線高 (m) 2			送信ノード空中線高 (m) 0.5			送信ノード空中線高 (m) 0		
距離 (m)	受信電力 (dBm)		距離 (m)	受信電力 (dBm)		距離 (m)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz		950MHz	2.4GHz		950MHz	2.4GHz
1	-39.5826	-45.0009	2	-42.5035	-63.7655	1	-38.1661	-66.7604
2	-38.6806	-58.2265	4	-58.0125	-61.162	2	-58.974	-60.046
4	-43.5617	-61.1257	8	-50.5397	-78.1679	4	-49.9619	-65.7264
8	-61.1568	-62.036	16	-62.5143	-76.7562	8	-62.8495	-73.7324
16	-49.9384	-72.3728	32	-68.3126	-82.2712	16	-66.7001	-84
32	-62.1901	-81.9375	50	-72.0401		32	-73.5336	
64	-67.1694	-92.8381	64		-91.1554	50	-81.2234	
100	-89.1573	-92.7123	100	-80.3718		64	-83.0134	
128	-79.8069		110	-85.5604		80	-83.87	
150	-87.6155					100	-83.7311	
170	-87.0112							

## 6 積雪有・丘越えでの測定（岩手大学農学部附属滝沢演習林）

送信ノード空中線高 (m) 2			送信ノード空中線高 (m) 0.5			送信ノード空中線高 (m) 0		
距離 (m)	受信電力 (dBm)		距離 (m)	受信電力 (dBm)		距離 (m)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz		950MHz	2.4GHz		950MHz	2.4GHz
1	-34.1999	-40.7333	1	-46.9936	-61.3873	2	-48.4474	-63.15
2	-38.8497		2	-47.7617	-59.0243	4	-58.2749	-74.2418
4	-48.6425	-57.5556	4	-54.0908	-64.5677	8	-52.0116	-68.2639
8	-60.1088	-63.9511	8	-60.8535	-65.1107	16	-59.0858	-68.5371
16	-71.3913	-74.605	16	-66.7033	-66.3811	32	-70.5381	-77.2157
32	-77.8149	-86.3502	32	-85.2288		50	-82.0086	
50	-76.2797		50	-87.1845		90	-86.6962	
64	-83.8307		75	-90.3135			-91.643	
80	-92.1903		80	-87.1388				
90								

## 7 雪で覆ったときの測定（岩手大学農学部附属滝沢演習林）

送信ノード空中線高 (m 2)		
雪厚 (cm)	受信電力 (dBm)	
	950MHz	2.4GHz
0	-43.9802	-63.5054
10	-50.5044	-76.5113
20	-45.175	-79.213
40	-43.6928	-84.3575
60	-42.7268	-87.1965
80	-42.7533	-90.1157
100	-52.8639	-88.6184
120	-38.7303	-91.9379
130	-39.215	-91.9384



## おわりに

現在、ICTの進展により携帯電話の高度化をはじめ、高速無線LANなどの多種多様な電波利用システムが次々と台頭し、市街地では便利で快適な生活に大いに役だっています。しかし、一方で山間部では新しい通信基盤の整備がなかなか進まない現状にあり、これに代わる有効な手段が待ち望まれていました。そこで、本調査検討会では、商用電源を必要としない省電力のセンサーネットワークをテーマとして取り上げ、およそ9箇月間かけて検討してきました。

本調査検討会では、関係する各分野の専門家の方々にお集まり頂き、机上の検討に加えて、岩手大学農学部附属滝沢演習林をお借りして昨年5月に新たに使用できることとなった950MHz帯の電波伝搬試験も行いました。アカマツ、コナラ、クリなど様々な樹木が広がり、自然環境の整った同演習林でフィールド試験が実施できたのは偏に岩手大学農学部の先生方及び演習林関係の皆様のご協力のお陰であり、深く感謝申し上げます。

岩手県は、広い県土を有し、全国的に見て林野率が高く、林業で生計を立てている世帯も多くおられます。また、日本有数の美しい山並みを有し、観光シーズンには全国から登山やトレッキングなどを目的に多くの方々が訪れます。しかし、一方では大自然と融合しているがゆえに、自然災害による被害も少なくなく、昨年6月の岩手・宮城内陸地震は記憶に新しい出来事です。

産業の振興や安心で安全な暮らしに少しでも役立つものをという思いで検討会を進めてきた結果、山間部におけるセンシングニーズを背景に想定されるシーンをまとめて、幾つかのアイデアとして整理することができました。

昨年12月と本年1月の電波伝搬試験は厳しい寒さの中での試験ということで、測定を担当された方々の疲労は相当ではなかったかと思えます。大変お疲れ様でした。クマへのGPS装置付きノードの装着を想定し、人が持ち歩いて山野を移動するという機能試験では、パソコン上に位置データが表示され有効に機能することが確認できました。

本調査検討会の報告書が、山間部における課題解決の方策として950MHz帯センサーネットワークを構築する際の一助としてお役に立てれば幸いです。

本調査検討会の座長としてご指導とご助言を頂戴しました岩手県立大学の澤本先生、作業部会主査の瀬川先生、フィールド試験の場所をご提供下さいました岩手大学の先生方、熱心にご討議いただきました委員の皆様々に深く感謝申し上げます。

平成21年3月

山間部における広域センサーネットワークの構築に関する調査検討会  
事務局