

音声データ伝送を用いた無線センサ - ネットワークシステムの  
技術的条件に関する調査検討

報告書

平成27年3月

音声データ伝送に適応した無線センサーネットワークシステム  
の技術的条件に関する調査検討会

## 目次

1. 調査検討の背景と目的.....	3
1.1. 調査検討の背景 .....	3
1.2. 調査検討の目的 .....	3
1.3. 調査検討項目と概要.....	4
1.4. 調査検討における実施体制.....	4
2. 920MHz 帯センサーネットワークシステムの概要 .....	5
2.1. 920MHz 帯無線システム.....	5
2.1.1. 920MHz 帯無線システムの種類.....	5
2.1.2. 920MHz 帯周波数の状況.....	6
2.1.3. 920MHz 帯無線システムの技術基準 .....	8
2.1.4. 920MHz 帯無線システムの新たな利用.....	9
2.2. 920MHz 帯センサーネットワークシステムの概要.....	9
2.2.1. 920MHz 帯無線の特徴 .....	9
2.2.2. マルチホップネットワーク.....	10
2.2.3. 920MHz 帯無線ネットワーク活用の拡大について.....	11
2.3. 920MHz 帯無線センサーネットワークシステムの利用ニーズ調査 .....	12
2.3.1. アンケート項目 .....	12
2.3.2. アンケートの結果 .....	12
2.4. 他の無線システムとの比較.....	17
2.4.1. 比較対象無線局.....	17
3. 920MHz 帯無線システムの諸元及び音声データ伝送の課題と対策について .....	20
3.1. 920MHz 帯無線センサーシステムの諸元 .....	20
3.2. 音声データ伝送に対するシステム要件.....	23
3.3. 音声データ伝送における課題 .....	23
3.4. 音声データ伝送における課題の対策 .....	26
4. 伝送モデルの机上検討（ラボ内試験） .....	27
4.1. ラボ内試験の概要.....	27
4.1.1. ラボ内試験環境と測定手順.....	27
4.1.2. 音声品質の評価指標.....	29
4.2. 最適なコーデックとパラメータの選定.....	31
4.2.1. 測定条件 .....	31
4.2.2. 試験結果.....	34
4.3. Ack 応答有無の比較.....	39
4.3.1. 測定条件 .....	39
4.3.2. 測定結果.....	40
4.4. デューティ制御方式の比較.....	42

4.4.1.	測定条件	42
4.4.2.	測定結果	43
4.5.	机上検討（ラボ内試験）のまとめ	46
5.	実証試験	47
5.1.	実証試験の概要	47
5.1.1.	フィールド試験項目	47
5.1.2.	フィールド試験環境と測定手順	47
5.1.3.	フィールド試験場所及び試験経路	50
5.2.	電波伝搬フィールド測定	51
5.2.1.	測定手順	51
5.2.2.	測定結果	52
5.3.	Ack 応答有無の比較	53
5.3.1.	測定条件	53
5.3.2.	測定結果	53
5.3.3.	ラボ内試験との比較	56
5.4.	デューティ制御方式の比較	58
5.4.1.	測定条件	58
5.4.2.	測定結果	58
5.4.3.	ラボ内試験との比較	60
5.5.	フィールド検証のまとめ	63
5.5.1.	結果	63
5.5.2.	考察	63
6.	周波数共用条件の検討	64
6.1.	無線システムの干渉要件	64
6.2.	音声データ伝送の無線設備の諸元	64
6.3.	隣接無線局との干渉検討	64
6.4.	同一周波数帯使用無線局との干渉	64
6.5.	自局システム間干渉	64
7.	音声データ伝送の技術的条件案	64
7.1.	適用範囲	64
7.1.1.	送信出力	64
7.1.2.	周波数	64
7.1.3.	送信時間制限	64
7.1.4.	電波防護指針	64
7.2.	まとめ	64
付録		65
付録 1	構成員名簿	66
付録 2	調査検討会の開催状況	67

## 1. 調査検討の背景と目的

### 1.1. 調査検討の背景

平成23年3月11日に発生した東日本大震災では、未曾有の津波被害により多くの通信網が途絶され、災害対策本部と避難所との連絡が出来なくなるなど、避難した場所の把握に時間を要した。避難した集落では、孤立したところも多く、集落の駐車場にSOSの文字を書いて救援を求めている光景が今でも思い出される。また、津波情報を伝達するのにおいても、混乱の中、どこまで正確に情報が伝達されたかという問題点も指摘されている。これらを教訓として、災害情報の伝達、災害時の通信手段の確保などの観点から、非常時に即応可能な通信網や通信方法の多様化が多くの自治体から求められている。通信網の多様化については固定電話、携帯電話や衛星回線など様々であるが、通信網の多様化を行うとなると、設置費用、ランニングコスト、通信料など各自自治体にかかる負担は大きい。このことから、自治体としては、経済的に無理なく、簡単に設置なシステムの導入が求められている。

岩手県大槌町では、同報系防災行政無線の補完システムとして3年前に制度化された920MHz帯を利用した無線システム(以下「無線センサーシステム」という。)を利用したネットワークシステム(以下「無線センサーネットワークシステム」という。)を構築し、データによる情報を迅速に住民に報知する試みが始まっている。920MHz帯無線システムは、小型で、防災行政無線システムよりも安く、20mW以下のシステムは免許不要であるため行政への手続きが安易である。また、UHF帯という電波の特性から見通し外通信に適しているほか、情報量に応じて200kHzから1MHzまで周波数帯域を可変できるため効率的にデータ伝送できるなど、多くの利点がある。一方、技術的条件さええば、誰でも使用できるシステムであることから、周波数干渉を受けやすく、信頼性の点でどこまで担保できるか確かでない。

無線センサーネットワークシステムを防災用途や通信インフラシステムとして使用する場合、緊急時に伝送する情報として音声は不可欠となる。音声通信を行うとなると、音声をデータ信号に変換(VoIP)して伝送することとなるが、無線センサーシステムは、データそのものを伝送することを主目的に制度化された無線システムであることから、音声品質を確保するための音声コーデックや音声信号のマルチホップ伝送などは詳細な検討がされていない。また、無線センサーネットワークシステムに音声通信を加えた場合、トラヒックの増加に呼応した周波数帯域占有率や他の無線センサーシステムとの干渉など、さらに検討を要する課題があり、防災用途や通信インフラの補完として利用できるか検証する必要がある。

このような状況を踏まえ、無線センサーネットワークシステムを防災補完用途及び通信インフラの補完システム等に役立つものとするために、音声データ伝送に対する技術的な調査検討を行い、周波数有効利用に資する技術的条件を明らかにする必要がある。

### 1.2. 調査検討の目的

無線センサーネットワークシステムを音声データ伝送に適応させるに当たり、他のシステムと共存可能とするための干渉回避のための条件について調査検討を行い、有効な無線センサーネットワークシステムの技術的条件を提言する。

### 1.3. 調査検討項目と概要

前述の目的を果たすために実施した調査検討項目及びその概要を以下に示す。

- (1)無線センサーシステムの概要
- (2)無線センサーネットワークシステム諸元及び音声データ伝送の技術的課題と対応策
- (3)ラボ内試験及びフィールド試験
- (4)他の無線局との干渉
- (5)技術的条件のとりまとめ
- (6)920MHz 帯無線ネットワークシステムのニーズと今後の課題

### 1.4. 調査検討における実施体制

調査検討を行うに当たって、利用者側の意見を幅広くいただくため、被災した自治体を主体とした構成員(構成員については、付録 1 構成員名簿を参照)からなる調査検討会を設置し、各調査検討項目に対して助言をいただいた。

## 2. 920MHz 帯センサーネットワークシステムの概要

### 2.1. 920MHz 帯無線システム

#### 2.1.1. 920MHz 帯無線システムの種類

920MHz 帯無線システムは、電子タグシステムやデータ通信システム(以下「電子タグシステム等」という。)として多くの分野で使用されているものである。種別としては、大まかにパッシブ系とアクティブ系に分類される。

##### (1) パッシブ系

パッシブ系は、一般的に IC タグ、電子タグ、RFID( Radio Frequency IDentification )などと呼ばれているもので、電波により固体認識を行うものである。物流管理や物品管理などで主に使用されている。基本構成は、無線による非接触(数 cm ~ 数 m)での送受信を行い、物品等の情報を同時一括で読み取る。タグからは自発的に電波を発射することはできず、電子タグの送信エネルギーにはリーダ/ライタからの搬送波の電力のみ(一部には、電子タグの内部回路や付属するセンサ等に電力を供給するために電池等を有しているセミパッシブと呼ばれるものもある。)を利用し、それ以外の電力は供給されない。

情報量はバーコードの数倍から数千倍程度有り、大量の物品管理や多くの情報を品物に記憶させたり、読み込みするのに適している。ID の読み出し機能のみの安価な製品から、情報の書き換え可能なものや各種センサと連携した情報管理等が可能な高機能製品まで様々な種類のタグがある。



ダンボール箱内の物品情報を一括読み取り

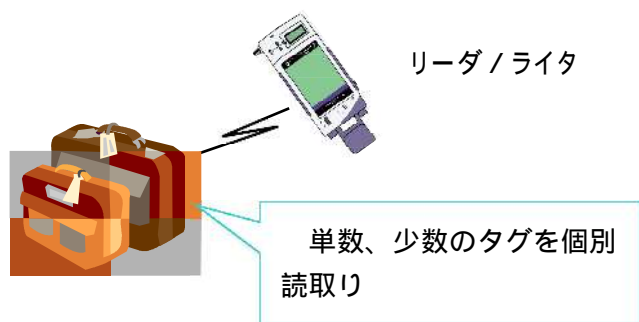


図 2-1. パッシブ系の利用例



図 2-2. RFID 受信側システム基本構成

(2) アクティブ系

パッシブ系とは異なり、内蔵した電源等からのエネルギーによりタグから自発的に電波を発射することができ、データ通信システムとして幅広い分野で使用されている。使用周波数帯が 950MHz 帯の時は、出力が 10mW 以下しか認められていなかったが、平成 24 年 7月からの 920MHz 帯の周波数移行に伴い、250mW までの出力が可能となった。また、使用可能な周波数帯域も従来から 8MHz 拡大され、約 15MHz となった。

現在、ネットワークシステムとしての利用価値が期待され、電気やガス分野におけるメーター制御等への利用拡大が進められている。また、ビームフォーミングアンテナを用いた DSSS 方式の検討も行われており、今後、屋外での利用が飛躍的伸びてくるものと考えられる。



図 2-3. アクティブ系の利用例

2.1.2. 920MHz 帯周波数の状況

携帯電話用周波数の逼迫に伴い、700/900MHz 帯の周波数再編が実施され、900MHz 帯の周波数が携帯電話用として新たに割り当てられた。これに伴い、950MHz 帯を使用していた電タグシステム等は、920MHz 帯へ移行することとなった。(図 2-4 参照)

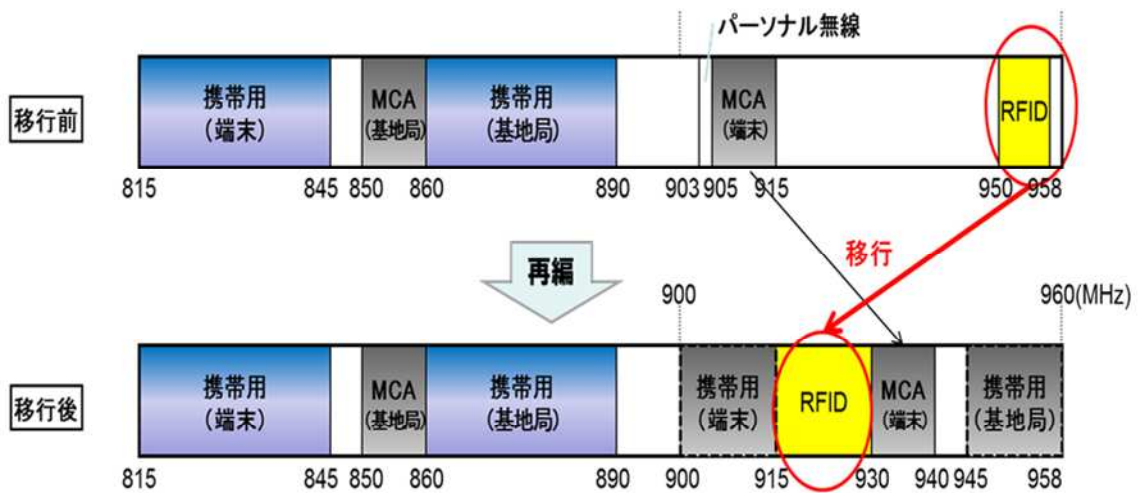


図 2-4. 920MHz 帯への移行

電子タグシステム等の周波数の移行は、平成 24 年 1 月から開始され、平成 30 年 3 月 31 日までに 920MHz 帯へ移行することとなっている。920MHz 帯は、950MHz 帯に比べて周波数帯域が拡大されたことからパッシブ系は大量にデータが短時間で読み込めるサブミラーキャリア方式を導入するとともに、アクティブ系はパッシブとの干渉が緩和されたことから空中線電力が 250mW まで拡大された。また、周波数の有効利用を図る観点から、928MHz-930MHz については、審判用無線として国際サッカー等に限定して使用できるようになっている。(図 2-5 及び図 2-6 参照)

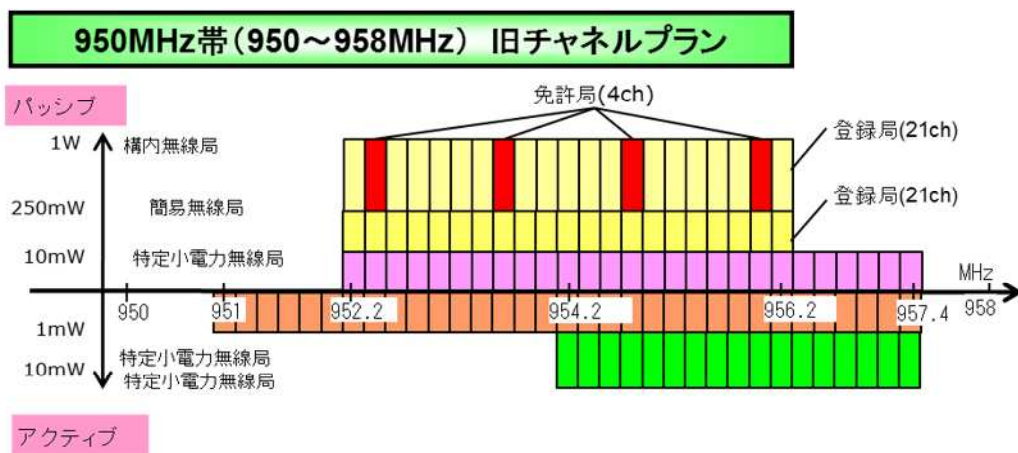


図 2-5. 950MHz 帯における旧チャンネルプラン



## 920MHz帯(915~930MHz) 新チャンネルプラン

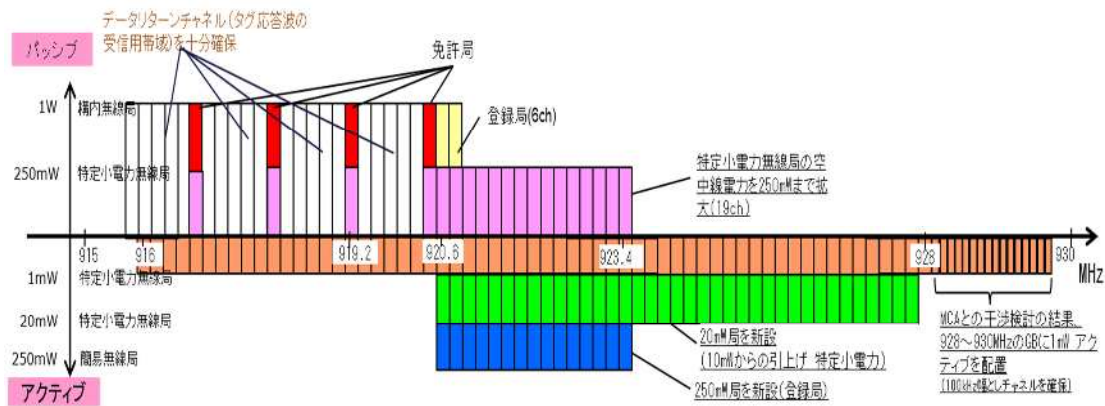


図 2-6. 920MHz 帯における新チャンネルプラン

### 2.1.3. 920MHz 帯無線システムの技術基準

電波法(昭和 25 年法律 131 号)における 920MHz 帯を使用する無線設備の技術基準は以下のとおりである。

表 2-1. 920MHz 帯無線の技術基準

	パッシブタグシステム		アクティブ系小電力無線システム		
	1W以下※	250mW以下	250mW以下	20mW以下	1mW以下
空中線利得	6dBi以下	3dBi以下			
周波数帯	916.7~920.9MHz	916.7~923.5MHz	920.5~923.5MHz	920.5~923.5MHz 923.5~928.1MHz	915.9~929.7MHz
チャンネル数等	免許局: 916.8, 918, 919.2, 920.4MHz: <b>計4チャンネル</b> 登録局: 免許局+920.6, 920.8MHz: <b>計6チャンネル</b>	916.8, 918, 919.2, 920.4~923.4MHzの200kHz間隔: <b>計19チャンネル</b>	920.6~923.4MHzの200kHz間隔: <b>計15チャンネル</b>	920.6~928MHzの200kHz間隔: <b>計38チャンネル</b>	①916~928MHzの200kHz間隔: <b>計61チャンネル</b> ②928.15~929.65MHzの100kHz間隔: <b>計16チャンネル</b>
無線チャンネル	免許局: 200kHz 登録局: 200kHz×n (n=1~3)	200kHz×n (n=1~5)			①200kHz×n (n=1~5) ②100kHz×n (n=1~5)
キャリアセンス時間	5ms以上	①5ms以上 ②128μs以上		128μs以上	キャリアセンス不要
キャリアセンスレベル	-74dBm	-74dBm(10mW以下の場合 は-64dBm)	-80dBm		----
最大送信時間	4秒	①4秒 ②400ms(総和360s/h以下)		400ms(総和360s/h以下)	①100ms(総和3.6s/h以下) ②50ms
送信時間後の停止時間	50ms以上	①50ms以上 (送信時間6ms以下の場合は0秒)		2ms以上(送信時間6ms以下の場合は0秒)	①100ms(総和3.6s/h以下) ②50ms

無線設備の免許形態としては、構内無線局(パッシブ系 1W)、簡易無線局(アクティブ系 250mW)、特定小電力無線局(パッシブ系 250mW 以下、アクティブ系 20mW 以下)の3つに大別される。

ARIB \* において電波法令を基に商用規格として ARIB STD-106(構内無線局)、ARIB STD-107(簡易無線局)、ARIB STD-108(特定小電力)が取り決められている。

#### 2.1.4. 920MHz 帯無線システムの新たな利用

電子タグシステム等のうちアクティブ系については、周波数の国際ハーモナイズ及び周波数帯域の拡大から、センサーネットワークシステムとしての利用価値が高まっている。

センサーネットワークシステムは、複数のセンサ付無線端末を空間に散在させ、それらが協調して環境や物理的状況を把握する無線ネットワークであり、M2M で使用されるコアな技術である。センサーネットワークシステムの用途は多岐にわたるが、主に監視、追跡、制御に集約することができる。具体例では電力や温度などのモニタ、赤外線や慣性センサによる行動モニタ、などが挙げられる。これらのシステムでは、多点を同時計測できるため、物理現象の分布変化を把握するのに有効である。また屋内配線において、電気機器のスイッチの ON/OFF の制御をセンサーネットワークで行うことで、大幅な配線削減が可能となる。

現在、スマートハウス向けやスマートグリッド向けの機器の開発やシステムの導入が活発化されている。特に次世代電力量計として期待されているスマートメーターを導入することが決定している東京電力では、2018年までに1700万台、2023年度までに2700万台を導入する計画とされている。

### 2.2. 920MHz 帯センサーネットワークシステムの概要

#### 2.2.1. 920MHz 帯無線の特徴

920MHz 帯無線は、2.1.2 で述べたとおり、平成24年7月から使用可能な周波数帯域が拡大されており、自治体などの自営の無線ネットワークや、大規模なネットワークシステムへの適用が期待されている。920MHz 帯無線の主な特徴については以下のとおりである。

##### (1) 電波到達性

建物や障害物がある環境でも透過や回り込みにより接続性が高く、長い通信距離を必要とする場合や、障害物が多い場所に適している。

##### (2) 干渉

スマートメーターやセンサーネットワークといった公共性の高い用途向けに活用されるため、無線LAN(Wi-Fi)の周波数帯より電波干渉が少ない。

##### (3) 低消費電力

無線の変調方式の特長とパケット伝送量の工夫により消費電力を小さくすることができる。これにより、電池による長時間の運用も可能になり、安定したシステムとして防災用途への適用が可能になる。

以上を429MHz帯無線や2.4GHz帯無線と比較した結果を図2-7に示す。

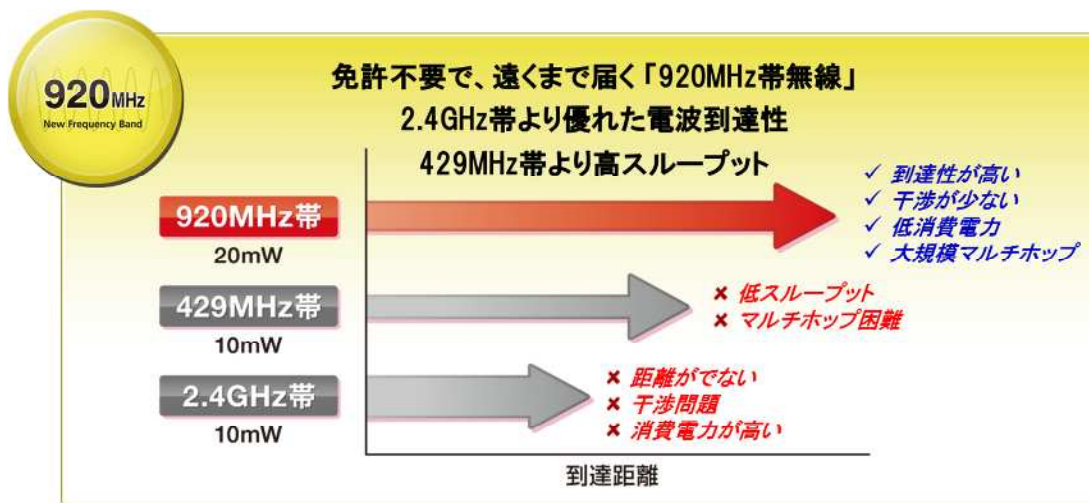


図 2-7. 920MHz 帯無線の特徴

また、920MHz 帯無線によるネットワークは、マルチホップネットワークを構成できるという大きな特徴がある。

### 2.2.2. マルチホップネットワーク

マルチホップネットワークとは、データをバケツリレーのように運ぶことが可能で、数多くの測定ポイントからのデータを広範囲で収集するのに適している。また、自動的な通信経路選択により、障害に強い柔軟な無線ネットワークの構築が可能である。この様子を図 2-8 に示す。

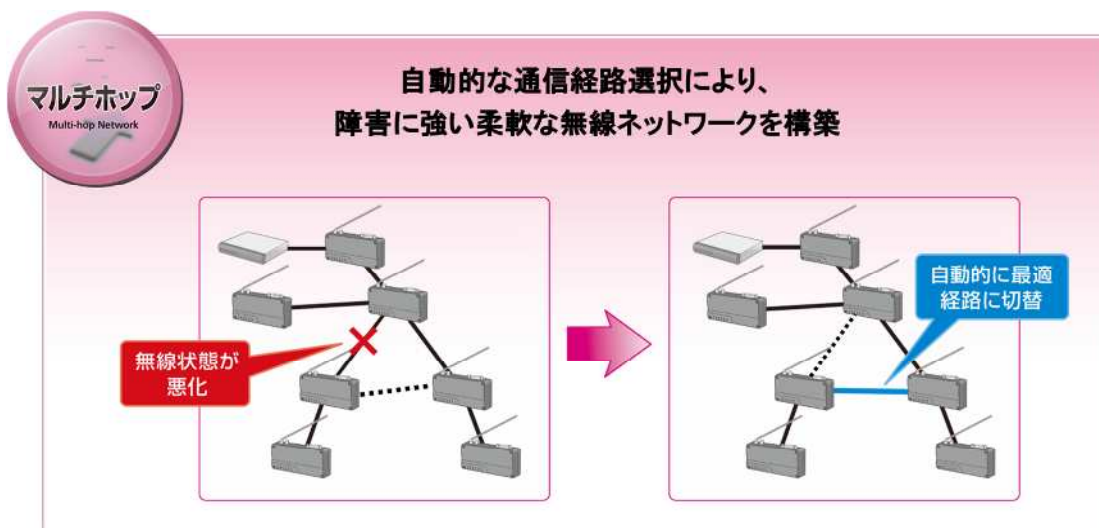


図 2-8. 無線マルチホップネットワークの特徴

## 2.2.3. 920MHz 帯無線ネットワーク活用の拡大について

### (1) スループット

周波数帯域幅が数 kHz の 400MHz 帯無線と比べて、最大で 1MHz の帯域幅の割り当てが可能な 920MHz 帯により、センサー監視や設備制御等へ適用が期待できる。また IEEE802.15.4g 規格対応により、伝送レートを上げることが可能となり、音声伝送による防災無線バックアップ等への適用にも期待できる。

### (2) ネットワークの運用性

920MHz 帯無線は、到達性に優れていることから、同じ種類のネットワークが近接して存在することが想定される。それ故、誤接続や干渉のない独立したネットワークを構築するために、機器毎の認証機能や、無線チャンネルの変更機能などが必要となる。また、複数のマルチホップネットワークを1つの監視装置で管理するなどの考慮も必要である。

この様子を図 2-9 に示す。

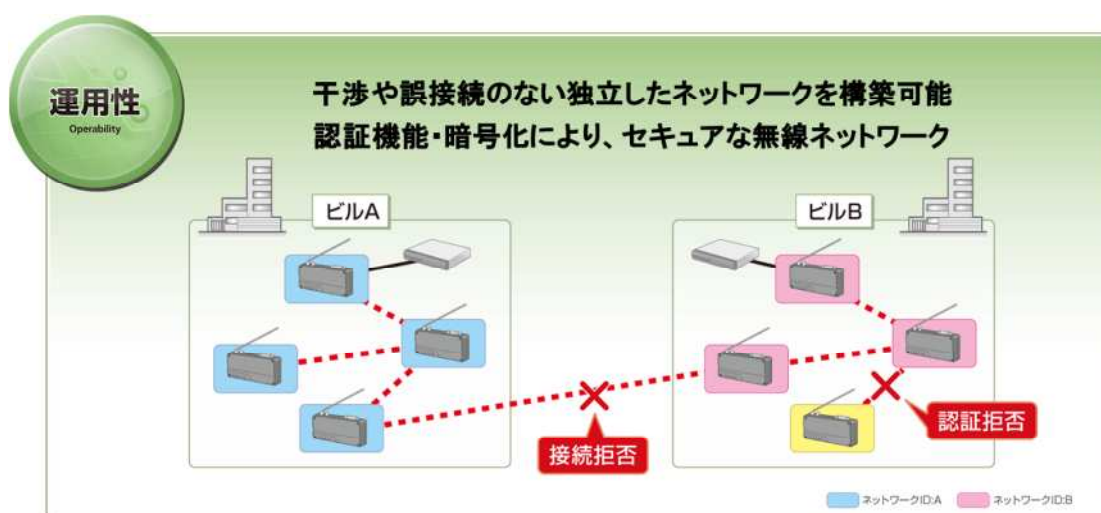


図 2-9. 無線マルチホップネットワークの運用性

### 2.3. 920MHz 帯無線センサーネットワークシステムの利用ニーズ調査

920MHz 帯無線センサーシステムの利用は、950MHz の時と比べて、使用周波数帯が広がったことにより、ネットワークとしての用途拡大の可能性が高まったことは前節で述べた。しかし、920MHz 帯無線センサーネットワークシステム(以下「920MHz 帯無線ネットワーク」という。)をどのように利用する方法があるか、また、防災無線の補完システムや通信インフラシステムとして利用していくためにはどのような点に期待や要望があるなど議論しつつ、その中で音声データ伝送の利用方法の対する幅広く意見をいただく必要がある。そのため、920MHz 帯無線ネットワークについて、アンケートを実施することとした。アンケートの実施に当たっては、岩手県内にある地方公共団体を主に行うこととした。その際、920MHz 帯無線システムの理解度が低いことにより、現実的な利用方法とかけ離れた意見の提出も考えられるため、アンケートに対する補足説明等が可能であり、920MHz 帯無線センサーネットワークについてある程度理解いただいている構成員を対象として行うこととした。

#### 2.3.1. アンケート項目

アンケートの項目は以下のとおり。

920MHz 帯無線センサ - システムを知っていたか。

920MHz 帯無線センサーネットワークを利用して実施したい又は実施できる用途

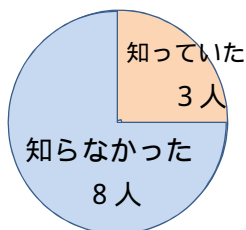
920MHz 帯無線センサーネットワークに音声データ伝送を加える場合の利用用途  
(防災用途以外)

920MHz 帯無線センサーネットワークの現状で課題があると認識している項目

920MHz 帯無線センサーネットワークに関するその他の意見

#### 2.3.2. アンケートの結果

問1:920MHz 帯無線センサーネットワークを知っていましたか。



8人は、当該システムに関しては「知らなかった」と回答している。「知っていた」と回答した3人の構成員は、当該システムに携わったことのあるメーカーやシステムを導入している構成員であることから、本無線ネットワークに関係しない人達は存在自体を知らなかった結果となった、との結果となった。

問2:920MHz 帯無線センサーネットワークを利用して実施したい又は実施できる用途は何が考えられますか。

回答について、判別を分かりやすくするため、公共業務で利用するケースと一般的な業務で使用する2つ区分けしてまとめた。

### 【公共業務の用途】

種別	用途
防災行政	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無線中継システムとしての利用</li> <li>・ゲリラ豪雨や落雷対策としてのデータ解析システム</li> <li>・気象ロボットに連結したシステムとして情報伝達の高度化利用</li> <li>・個別受信機（アンサーバック）への適用</li> </ul>
水防	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リアルタイムでの水位監視</li> <li>・河川などの非電源化地域からの水位データ送信</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・交通量に関するデータ伝送</li> </ul>

### 【一般業務の用途】

種別	用途
セキュリティ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・町内・集合住宅向け「回覧板（掲示板）システム」</li> <li>・子供・高齢者向け「安否確認（防犯）システム」</li> </ul>
産業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<small>ほじょう</small>圃場の管理（農業管理システム）</li> </ul>
環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・野生鳥類の監視</li> </ul>
通信事業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・FWA の用途での利用</li> <li>・2.4GHzWi-Fi の周波数逼迫の解消のための利用</li> </ul>
その他	潮位観測システム

公共業務用としては、防災に絡んで、ネットワークシステムとしての利用に意見が多く集まった。一般業務用としては、住民向けシステムへの利用や逼迫する周波数帯を利用している電気通信事業システムの代替利用などがあげられた。電気通信事業システムの代替利用は、電気通信事業者との相互接続が可能であることが前提であり、接続料が高ければ 920MHz 帯無線センサーネットワークの利用価値は薄いとの意見であった。

また、全体的意見の傾向としては、920MHz 帯以外の他の周波数帯で特定小電力システムとして利用されているシステムを 920MHz 帯無線センサーネットワークに応用することへの期待の意見が集まった。

問3：音声データ伝送を可能とした920MHz帯無線センサーネットワークの利用用途は何かありますか。

回答については、判別しやすくするため、多くの用途で利用できるケースと限定的な用途として利用するケースの2つに区別した。

【多用途】

用途
・HEMS(ハムス)*に音声機能を付加して家庭内のインターフォンとしての活用 ・BEMS(ベムス)*に音声機能を付加して企業内内線電話 ・同報系の補完機能として、携帯受信機を使用した告知放送機能への活用 ・特定小電力のトランシーバーとしての利用(データと音声の両機能) ・無線LANのようなネットワーク利用

\*電力使用量の可視化、節電(CO2削減)の為に機器制御、ソーラー発電機等の再生可能エネルギーや蓄電の制御等を行うシステムを総体としてエネルギー監理システム(EMS)と言う。その管理対象が住宅向けの場合はHEMS(Home Energy Management System)といい、商用ビル等の場合をBEMS(Building Energy Management System)という。このほか、工場向けFEMS(Factory Energy Management System)があり、これらを総体してCEMS(City/Community Energy Management System)と呼んでいる。

【限定用途】

用途
・レジャーランド、テーマパークにおいてアトラクション等の混雑状況の情報など情報配信 ・構内放送 ・イベントなどでの臨時放送や連絡設備としての活用

音声データ伝送が可能な920MHz帯無線センサーネットワークの利用用途については、防災用途を除くと、省エネルギー対策として有効的との意見が上げられている。特に、市場ニーズが増えてきているEMSへの応用が期待されている。また、限定用途としては、限られた地域内(構内)で簡易なネットワークを構成して音声データを利用することなどの意見が上げられた。

問4：920MHz帯無線センサーネットワーク利用に当たって、課題と考えられる点について教えてください。

本調査検討では、920MHz帯無線センサーネットワークに音声データを付加する課題について検討するものであるが、データ伝送利用を前提として音声データを伝送することとなることか

ら、920MHz 帯無線センサーネットワーク全般について利用者側からの視点で課題と考えられる点について意見を伺った。いただいた回答については、判別しやすいように「技術的課題」、「電波の特性上の課題」、「運用における課題」の3点に分けてまとめた。

【技術的課題】

用途
<ul style="list-style-type: none"> <li>・マルチホップにおける信頼性(通話の断等)及び通信速度、オーバーヘッドの改善</li> <li>・アンテナの大きさや設置高の配慮</li> </ul>

【電波の特性上の課題】

用途
<ul style="list-style-type: none"> <li>・山間地などの入り組んだ地形では、不感地帯解消のため中継局の設置が多くなるのではないか。</li> <li>・遮蔽物が多い地形だと、通信エラーのための再送信回数が多くなるのではないか。</li> <li>・トラヒック量が上がると他のシステムとの干渉が多くなる。</li> </ul>

【費用における課題】

用途
<ul style="list-style-type: none"> <li>・他システムと比較して設備の設置費用が高くなるのではないか。</li> <li>・保守管理費が高い。</li> </ul>

【運用における課題】

用途
<ul style="list-style-type: none"> <li>・システムの全体像を把握していないと使いづらく、機器の操作が煩雑</li> <li>・20mW 以下のシステムが近接地域で複数使用され、干渉が発生した場合の使用者間調整</li> <li>・特性を理解した上での通常時の利用と有事の際(非常時)のルールづくり</li> </ul>

運用における課題としては、信頼性を求める意見が多い。その中に、920MHz 帯無線センサーネットワークが他の無線システムとどのように異なるのが不明な点を指摘する意見があるため、他の無線システムとの比較を示す必要があると考えられる。また、山間地域ではノード数が少ないのに対して中継局が多段となるためフェージングによる影響などが懸念された。その一方、ノード数が多くなると想定される地域では、920MHz 帯無線センサーネットワークが他の無線システムと周波数を共用して使用するものであることから、他の無線局からの干渉を受ける懸念があるとの意見が出された。特に使用者が不特定な空中線電力 20mW 以下の特定小電力無線局については、干渉が起こった場合の利用者間の調整が困難との意見があった。また、ネットワークのエリアが広範囲になるとノード数が増え、システム規模が大きくなることから、システム構成が複雑となり、機器操作の習熟やシステムの特性を十分理解することが必要、また通常時と非常時の運用ルールづくりが必要との意見が出された。



以上の課題のほか以下のような意見があった。

- ・ネットワークシステムについては、2.4GHz 帯システムと比較して使用の切り分けが必要である。
- ・日常的な活用方法、複合的な利用方法の具体化を合わせて検討しなければ普及は厳しいのではないか。
- ・920MHz 帯無線センサーネットワークシステムの利用は、都市部、平野部に適しており、山間部は適さないのではないか。
- ・多ホップについては、データ通信の部分で掘り下げて検討することを優先すべき。
- ・無線モジュールの小型化、空中線技術の向上などが必要。

参考として、防災無線システムを利用している自治体の構成員から、現在、防災無線システムの補完としているシステムについて意見もいただいたので、資料 を参照されたい。

## 2.4. 他の無線システムとの比較

前節のアンケートの中で、「920MHz 帯センサーネットワーク無線システムと他の無線システムとの違いがよく分からない」という意見が多かったことから、防災行政無線システムおよび電波を利用した代表的なネットワークシステムとの簡易な比較を行った。

### 2.4.1. 比較対象無線局

比較対象無線局として、防災行政無線は大槌町で現在使用されている 920MHz 帯センサーネットワーク無線システムの利用方法を考えて、60MHz 帯を使用した防災行政無線の同報系とした。また防災行政無線はネットワークを単独で組めるようなシステムとなっていないことから、一般に広く利用されている 400MHz 帯ネットワークシステム、2.4GHz 帯無線 LAN システムを対象として比較調査を行った。その結果を表 2-2 に示す。

表 2-2. 各種無線の比較

項目	防災行政無線 (同報系)	920MHz帯無線	2.4GHz帯無線 (無線LAN)	備考
周波数	60MHz	920MHz	2.4GHz	
周波数割当	専用波	共用波	共用波	
空中線電力	10W	250mW	10mW/1MHz	
免許手続き	正式な免許手続き要	簡易な免許手続き	不要	920MHz(20mW)は 免許不要
無線従事者	要	不要	不要	
伝送速度	45kbps	100/400kbps	11Mbps	
通信距離 (平坦大地)	10km以上	約2km	約1km	メーカー各社の製品情報を元に記載
中継段数	最大3段	メーカー仕様による (OKI:最大30ホップ)	メーカー仕様による	
音声データの 双方向伝送	親局制御による場合のみ 可	可	可	音声データ伝送時は ホップ数に制限あり
通信の信頼性	高 干渉なし、迂回なし (中継局で無線機2重化し 信頼性向上)	高 干渉少、迂回あり	低い 干渉多、迂回なし	通信の安定性を干渉、 迂回有無で比較
無線機価格 (アンテナ込み)	150万円前後	10万円前後	10万円以下	
運用コスト	高	中	低	

#### (1) 周波数特性

周波数特性は、防災行政無線(同報系)が利用している電波の波長が長く空中線電力が 10W と大きいため、電波の到達距離が長い。また周波数も専用線波として指定されているため混信が少なく、他の無線システムと比較して優位性がある。一方、周波数帯上、スプラジックE層などによる異常電波伝搬によるフェージングの影響を受けることがある。

#### (2) 無線局免許手続

無線免許手続については、2.4GHz 帯無線 LAN システムが無線従事者及び無線機局免許とも不要であることから免許に関する手続が必要ない。920MHz 帯無線は、20mW

以下が無線従事者及び免許手続とも不要であるが、20mWを超えるものは、簡易な無線局(簡易無線局)としての手続が必要である。防災行政無線は、無線従事者の配置及び免許手続とも必要であるほか、毎年、1局あたり電波利用料(38,100円)がかかる。

平成26年度の電波利用料の改定により、アンサーバック局は1,100円となった。防災行政の用途の場合は、さらに2分の1の額となる。

### (3) 伝送速度

伝送速度は、基本的にチャンネル当たりの周波数帯域幅に依存するものである。83.5MHzの帯域に対して、周波数ホッピング方式が認められている2.4GHz帯無線LANが11Mbpsと他のシステムと比較して群を抜いている。

### (4) 音声の双方向通信

子局からのデータ通信(アンサーバック機能を除く)が可能なシステムとしては、920MHz帯無線システムと、2.4GHz帯無線LANのみである。

### (5) 信頼性

防災行政無線(同報系)は周波数が専用線波とされていることから混信が少なく、回線品質の基準く信頼性が高い。2.4GHz帯無線LANは、他用途のシステム数が多数存在しトラヒック量が高いことから混信の影響を加味して一番低くなっている。

### (6) 費用

無線機価格については某メーカーを参照にしたものであるため、一概には言えないが、防災行政無線システムが150万円程度、920MHz帯無線システムと2.4GHz帯無線LANが10万円程度である。ネットワークを構成する場合は、構成に応じた端末数が必要となり、その設備数により全体の費用は異なってくる。

また、運用管理においては、防災行政無線システムは無線局が法令手的に求められている検査などがあるため高価なものとなっている。他のシステムは法令的に管理が強制的に求められるものではないことから、ユーザー側とメーカーとの保守契約に依存することとなる。

### (7) 総合比較結果

920MHz帯無線システムと防災行政無線(同報系)、2.4GHz帯無線LAN比較のまとめ方として、本調査検討の目的は、通信インフラシステムとしての補完的な利用が目的での音声データ伝送システムのネットワーク構築にある。一方、防災行政無線(同報系)は、ネットワークの構成が困難であることから、防災行政無線(同報系)と2.4GHz帯無線LANと区分けしてまとめることとした。

#### 防災行政無線(同報系)

920MHz帯無線システムと比較して、周波数の特性からは、防災行政無線の方がはるかに利点は大きい。免許手続が必要なこと、設置、維持コストがかかる。音

声通信主体のシステムであるため、伝送速度が低くデータ伝送には適していない。  
また、双方向通信でないため、電話のような通信は困難である。

#### 2.4GHz 帯無線 LAN

コストや無線局免許手続においては、2.4GHz 無線 LAN が勝っているが、多様なシステムが利用しており、トラフィック量が大きいため、混信(通信エラー又は通信待ちの状態)となるリスクが高い。920MHz 帯無線システムも多様なシステムが利用しているのは同様であるが、空中線 250mW のものは、簡易免許局の取り扱いとなり、混信が生じた場合は、免許不要局に対する法令的優位がある。

なお、通信距離について、実機での実力値を比較してみたので参考とされたい。  
(参考資料 - )。

本比較は、特定の無線システムとの簡易な比較であり、これによりシステムの優劣をつけられるものではない。実際のシステム構築の際に伝送すべき情報や伝送ルートに応じて今回の比較が参考となることを期待する。

### 3. 920MHz 帯無線システムの諸元及び音声データ伝送の課題と対策について

#### 3.1. 920MHz 帯無線センサーシステムの諸元

本調査検討会で使用した無線装置の諸元を表 3-1 に示す。

表 3-1. 無線局の諸元

項番	項目	仕様
1	使用周波数	920.6MHz ~ 923.4MHz
2	空中線電力	250mW (定格出力)
3	最大占有周波数帯幅	800kHz (1ch あたり 200kHz 4ch 束ね)
4	変調方式	GFSK 変調方式
5	無線伝送レート	400kbps 以下
6	メディアアクセス方式	CSMA/CA 方式
7	キャリアセンスレベル	-88dBm
8	空中線利得	2.15dBi
9	デューティ制限	1 時間あたりの送信総和時間が 360 秒以下
10	送信休止時間	2ms
11	無線機器の構造等	・外形寸法： 289(幅) × 281(奥行) × 624(高さ)mm (突起物は除く) ・質量： 50Kg 以下 (蓄電池除く) ・電源電圧： AC100V ± 10V 50/60Hz ・防塵防水： IPx4 (防沫) ・消費電力： 124VA 以下 ・外部接続インタフェース： RS232C、Ethernet(RJ-45)、アンテナ接栓 x 2

#### 1) 空中線電力

特定小電力無線である 20mW 出力の場合、市街地では過去の電波伝搬測定結果より、数百 m 程度の到達距離である。そのため、山間部でのインフラシステムとしての利用を想定して、法令で認められている最大空中線電力 250mW としている。

#### 2) 周波数帯域幅

後述する項番 5 の無線伝送レートにおいて、最大伝送レートを 400kbps としている。伝送レートを 400kbps とするには、周波数帯域幅が 800kHz 必要となるため、この周波数帯域幅としている。

#### 3) 変調方式

920MHz 帯無線の国内規定に適用可能な国際標準として、センサーネットワークやスマート

メータなどへの適用が期待されている IEEE802.15.4g が挙げられる。IEEE802.15.4g の変調方式では、OFDM 方式、O-QPSK 方式、FSK 方式が定義されているが、無線伝播の到達性を考慮して、FSK 方式を採用している。

#### 4) 無線伝送レート

IEEE802.15.4g の代表的な伝送レートは 100kbps モードであり、間欠的に送信されるセンサーデータの収集ではよく用いられている。しかし、音声データのようなストリーム型のデータ伝送には、100kbps モードでは十分でないため、IEEE802.15.4g における FSK 方式の最大伝送レートである 400kbps モードを選定している。

#### 5) デューティ制限

920MHz 帯無線は、様々なシステムで共用する帯域として使われることを想定しているため、特定の無線局が帯域を占有することがないように、送信時間に制限が既定されている。この制御をデューティ制限と呼んでいる。現状は、1 時間あたりの送信総和時間が 360 秒以下に制限することが電波法令で規定されており、一般的に「10%デューティ」と呼ばれている。

10%デューティを行う方法としては、パケット送信毎に 9 倍時間の送信休止時間を設ける方法が挙げられる。この様子を図 3-1 に示す。

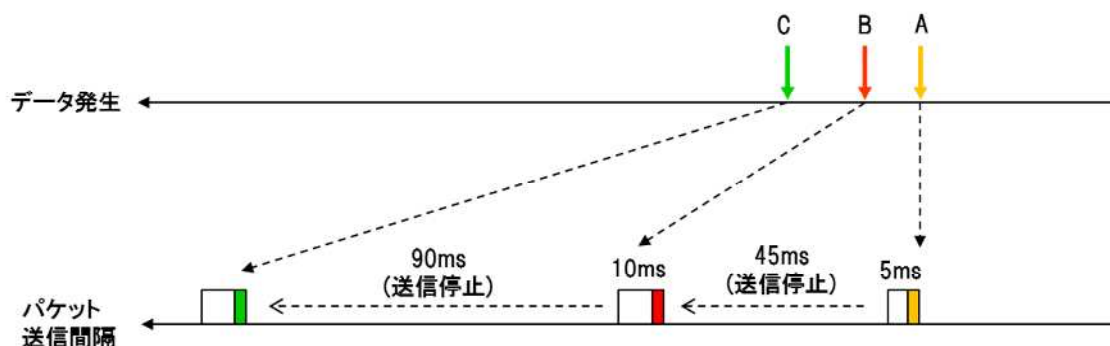


図 3-1. デューティ制御の動作例

図では A ~ B のパケットが送信される様子を示している。まず、A のパケットの送信時間が 5ms であった場合、9 倍となる 45ms の時間は、次のパケットとしては送信されず送信停止となる。45ms の送信停止後に、B のパケットが送信されるが、B のパケット送信時間が 10ms であった場合、その 9 倍となる 90ms が送信停止時間となる。

#### 6) 送信休止時間

デューティ制限と同様に、特定の無線局が帯域を占有することがないように、連続送信可能な時間が規定されている。この規定は連続送信時間によって異なり、その時間によって送信停止時間が規定されている。この様子を図 3-2 に示す。

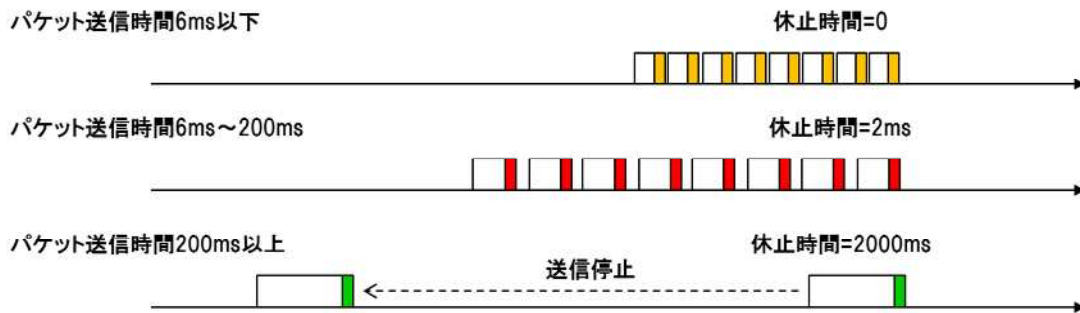


図 3-2. 送信休止の動作例

パケット送信時間が6ms以下の場合、休止時間は0なのに対して、パケット送信時間が6ms～200msの場合は、休止時間が2ms必要となり、パケット送信時間が200ms以上の場合、休止時間は2000ms必要となる。

また、無線装置の空中線仕様を表 3-2 に、データ伝送の仕様を表 3-3 に示す。なおこれらの仕様は本調査検討会の請負業者である沖電気工業株式会社の製品仕様をモデルとしている。

表 3-2. 空中線仕様

項番	項目	仕様
1	アンテナ形式	スリーブ型アンテナ
2	入力インピーダンス	公称 50
3	VSWR(定在波比)	1.5 以下
4	利得(標準値)	2.15dBi
5	アンテナサイズ	860mm
6	質量	約 0.6kg

表 3-3. データ伝送仕様

項番	項目	仕様
1	ホップ数	最大 30 ホップ
2	接続台数	最大 100 台

#### 7) 空中線仕様

マルチホップ環境においては、送信局と受信局の関係が必ずしも1対1にならず、隣接する複数の無線局との送受信が必要となる。そのため、すべての隣接局間で指向性を合わせる事が困難であるため、一般的なマルチホップ無線ネットワークでは、安価で小型な無指向性のスリーブアンテナを採用している。

### 3.2. 音声データ伝送に対するシステム要件

データ伝送を主目的としたセンサーネットワーク上で音声データを伝送する場合に考慮すべきシステム要件を表 3-4 に示す。

表 3-4. 音声データ伝送の要件

項番	項目	要件	備考
1	音声コーデック	選択する音声コーデック種別により発生するデータ量が異なる G.711 (64kbps) G.729 (8kbps) G.723.1 (6.3/5.3kbps)	
2	伝送遅延	End to End で片方向 300ms 以下	
3	パケットロス	1%未満	VoIP-GW の音欠け補完機能により通話品質の向上は可能
4	通話時間	連続通話が可能なこと	

#### 1) 音声コーデックの要件

ネットワーク上で効率的に音声データを伝送するために音声データの符号化/復号化を行うコーデックは圧縮率の違いなどから複数存在する。ITU-T では、様々な音声コーデックが勧告されており、主に VoIP (Voice over IP) で使用されているものとして G.711, G.723.1, G.729 などがある。

#### 2) 伝送遅延、パケットロス

音声コーデックのデータを伝送するのに許容される遅延やパケットロスに関するもので、遅延 300ms 以下、パケットロス 1%未満といった要件となる。

#### 3) 通話時間

通話に十分な時間の連続通話が可能であることが要件となる。

これらの要件を既存の無線センサーネットワークで実現する場合の課題を 3.3 で説明する。

### 3.3. 音声データ伝送における課題

無線センサーネットワーク上で、上記音声データの伝送要件を満たすための課題として、最適なコーデック及びそのパラメタの選定に関する課題、マルチホップ環境で発生するパケットの衝突や干渉によって生じる再送パケットの増大、パケット再送/中継時のデューティ制御による伝送遅延の増大、の3つの課題が挙げられる。これらの課題と要因を表 3-5 に示す。



表 3-5. 音声データ伝送における課題と要因

項番	課題	要因
1	最適なコーデック/パラメータの選定	コーデック種別やパケット送信間隔の違いにより、パケットあたりのヘッダ量が異なるため
2	衝突/干渉による再送パケットの増大	マルチホップ環境では隠れ端末の関係になりやすいため
3	伝送遅延の増大	パケット再送/中継時にデューティ制御が働くため

(1) 最適なコーデックとパラメータの選定

コーデックによりデジタル化された音声データを IP ネットワーク上で伝送するためには、一般的に UDP/RTP というプロトコルが用いられる。この際、音声コーデックの種類や、コーデックの設定によってパケットのサイズ、送信間隔が変わることでデータパケットに占める音声データの割合が変わるため、実際に使用する帯域が異なる。例えば、コーデックとして G729.a を用いた場合でも送信間隔が 50ms の場合の使用帯域は 18.72kbps であるが 100ms 間隔の送信では 13.36kbps となる。一般に、圧縮率の高いコーデックを使うことで使用帯域は小さくなり、その際のパケット送信間隔を短くすると遅延を小さくできるが、逆に使用帯域は大きくなる。こうした関係を図 3-3 に示す。

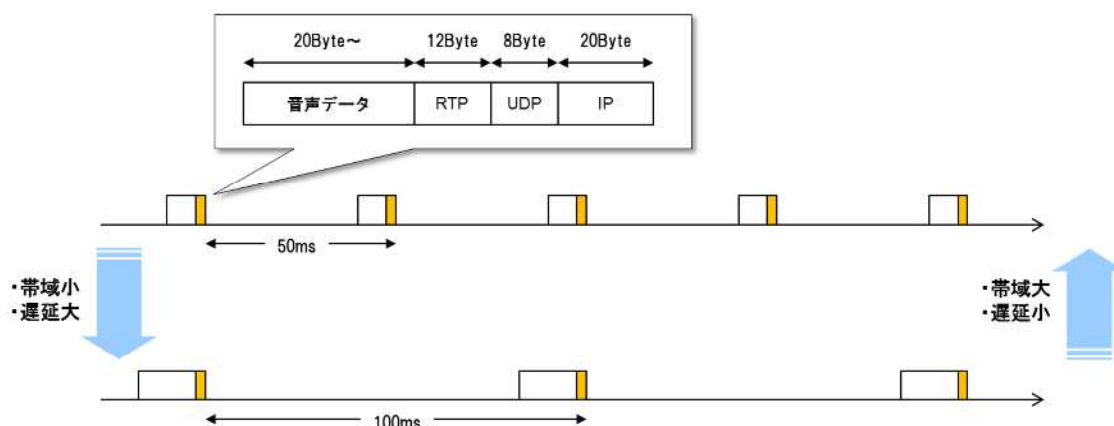


図 3-3. 送信間隔と使用帯域、遅延の関係

(2) 衝突/干渉による再送パケットの増大

マルチホップ通信を行う無線センサーネットワークでは、隠れ端末による衝突が発生する。図 3-4 にその関係を示す。親局、子局はお互いに直接通信できない距離に設置されていると仮定し、中継局を介して互いにデータをやり取りすることとする。子局と親局は直接通信できないためキャリアセンスを利用した衝突回避の仕組みがうまく働かない。そのため、親局と子

局が中継局に向けて同時にデータを送信すると中継局は2つのデータを同時には受信できず、子局と親局両方のデータの送信に失敗することとなる。既存システムのデータ送信ではデータの到達確認を行っているため、正しくデータを受信できた場合にAckパケットを返信するが、この場合、中継局でデータが受信に失敗しているため、Ackが返信されない。すると子局と親局はパケットの再送を行うが、この再送に関しても同じタイミングになりやすいため、再び同様な衝突が発生しやすくなる。これにより、複数回の再送を要することとなり、遅延の増大となりやすく、最悪の場合、複数回の再送パケット全てが衝突となる場合は、データをロスしてしまうこととなる。

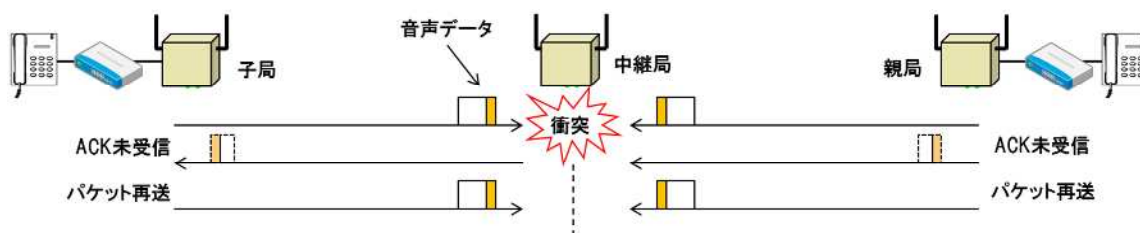


図 3-4. 隠れ端末による衝突とパケット再送

### (3) 伝送遅延の増大

電波法の規定として1時間当たりの送信時間を360秒以下とするという規定がある(以下「10%デューティ」という。)。10%デューティを守るための方法の1つとして、3.1で述べたようにパケット送信毎に、パケット送信にかかった時間の9倍の時間だけ送信を停止してから次のパケットを送信する方法が考えられる。この方法について図3-5に示す。

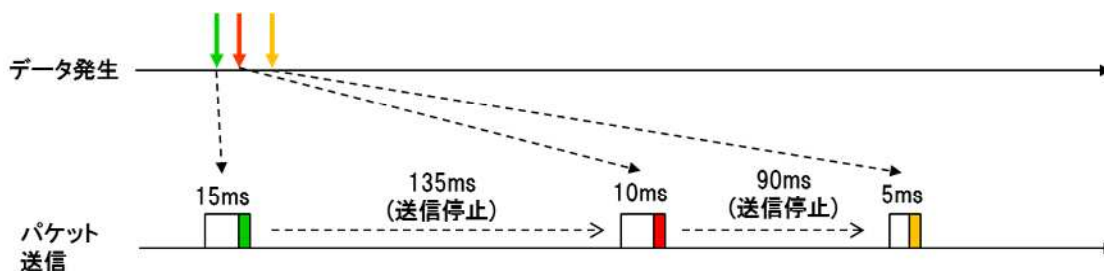


図 3-5. パケット毎に行うデューティ制御

データが続けて3つ発生した場合、初めのパケットの送信時間が15msであったとすると、135ms送信停止して次のパケットを送信し、次のパケットの送信時間が10msであった時には90ms送信停止したのちに最後のパケット送信しなければならない。このため、最後のパケットの送信では200ms以上の遅延が発生することになる。こうした現象がマルチホップ環境ではホップ毎に発生するため、結果としてエンドツーエンドの遅延はさらに増大してしまうという課題がある。

### 3.4. 音声データ伝送における課題の対策

#### (1) 最適なコーデックとパラメータの選定

センサーネットワーク上でのデータ伝送に最適な音声コーデックを選定するために、音声コーデックの使用帯域とセンサーネットワークのスループットを比較し音声トラフィックを収容できる量(理論値)を算出し、次にその条件で実機を用いた評価を行う。

#### (2) 衝突/干渉による再送パケットの増大

衝突/干渉による再送パケットの増大に対する対策として、音声データパケットは Ack なしとすることで、連続でパケットが衝突することを回避する方法が考えられる。音声データの特徴として、パケットロスが発生しても数パケットのロスであれば復号した音声に与える影響が小さいという特徴がある。さらに、複数回の再送で遅延が大きくなったパケットを遅れて受信しても音声の復号に役に立たないこともある。そのため、Ack による再送を行わず、衝突したパケットを廃棄することで、連続でパケットが衝突することが起こりにくくなる効果や、Ack の送信分だけスループットが向上する効果が期待できる。

#### (3) 伝送遅延の増大

デューティ制御による伝送遅延の増大の対策として、連続して送信データが発生しても、1時間あたりの送信時間が360秒以下であれば図 3-6 のように続けて送信することができるため、1時間あたりの送信時間の総和をカウントして制御する方法が考えられる。この方法であれば、遅延の増加はわずかに抑えられるものの、連続した送信が長期間続いた場合は遅延が増大し、10%制限を超えた場合には送信不可能となる。

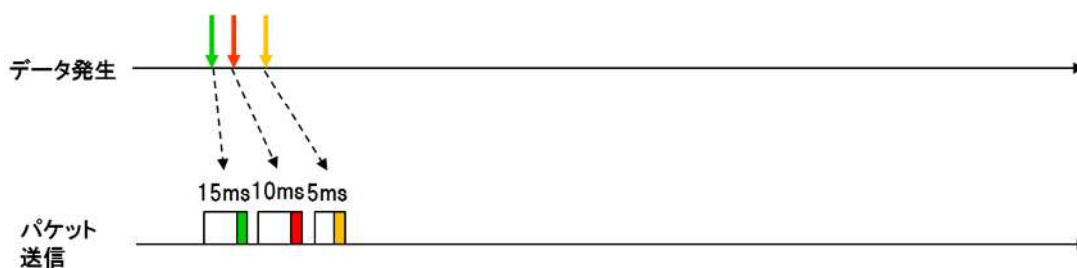


図 3-6. 1 時間毎に行うデューティ制御

## 4. 伝送モデルの机上検討(ラボ内試験)

### 4.1. ラボ内試験の概要

3.4 の対策について、以下に挙げる 3 点を試験することとする。

(1) 最適なコーデック/パラメータの選定

(2) Ack 応答の有無による比較

(3) デューティ制御方式による比較

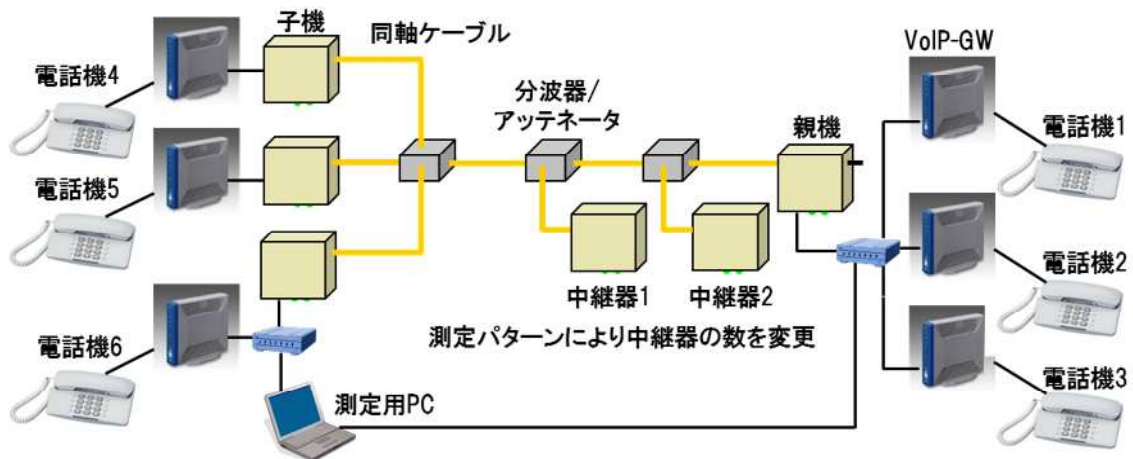
その手法を表 4-1 に示す。

表 4-1. ラボ内試験の評価手法

項番	課題	評価手法
1	最適なコーデック/パラメータの選定	VoIP コーデック、ホップ数、同時回線数に対する評価を行い、その結果から最適なコーデックとパラメータを選定する。
2	衝突/干渉による再送パケットの増大 (Ack 応答有無の比較)	項番 1 で選定したコーデック/パラメータを用いて、同時接続環境での Ack 応答の有無に対する性能評価を行う。
3	伝送遅延の増大 (Duty 制御方式の比較)	項番 1 で選定したコーデック/パラメータを用いて、同時接続環境でのパケット毎デューティ制御と 1 時間毎デューティ制御方式の性能評価を行う。

#### 4.1.1. ラボ内試験環境と測定手順

ラボ内試験における機器の接続系統及び使用機器を図 4-1 に示す。



機器名称	型番
VoIP-GW	BV100-SIP (OKI)
無線機 (子機、中継機 親機)	TD8010C (OKI)
電話機	パコル ix-2 (OKI)
同軸ケーブル	RG316 (JOYMAX)
分波器	ZFRSC-183-S+(Mini-Circuits)
アッテネータ	AT-120 (HRS)
ハブ	GS105E (NETGEAR)
測定用 PC	Dynabook satellite (TOSHIBA)

図 4-1. ラボ内実験の接続系統



図 4-2. ラボ内実験環境

無線機(親機、中継機、子機)間を同軸ケーブルで接続し、アッテネータを使用して信号を減衰させることで、親機、子機間で直接通信できない環境を構築し、中継機がデータを中継するマルチホップ環境となるように調整する。この中継器の設置数を変更することで、任意のホップ数の環境を構築することが可能になる。無線機(親機、子機)には音声信号を VoIP パケットへ変換する VoIP-GW が接続されており、電話をかけると VoIP トラフィックが送信される。この VoIP-GW が送信する VoIP パケットをハブでキャプチャし測定用 PC でログ保存を行うことでパケロス、遅延、揺らぎなどの評価を行う。

#### 測定手順

1. VoIP-GW のコーデック種別や送信間隔などのパラメータを変更する。
  2. 同軸ケーブルをつなぎ替えて中継機の数を変更し、測定条件の中継数(ホップ数)にする。
  3. 測定条件の同時通話の回線数(同時回線数)に合わせて通話を開始する。
    - 1 回線の場合:電話機 4 から 1 への通話
    - 2 回線の場合:電話機 4 から 1 への通話、5 から 2 への通話
    - 3 回線の場合:電話機 4 から 1 への通話、5 から 2 への通話、6 から 3 への通話
  4. 測定時間の経過を待ち、測定用 PC で取得したログから遅延/揺らぎ/パケットロスを算出する。
  5. 1. に戻り、次の測定条件の評価を行う。
- 表 4-1 の 3 つの評価全てにおいて同様の方法で行うものとする。

#### 4.1.2. 音声品質の評価指標

図 4-1 の検証環境を用いて測定する値は、音声データの遅延、揺らぎ及びパケットロスであるが、音声データの遅延/ジッター/パケットロスの値では、音声品質の適否を判断しにくいことから、定量的な評価指標として『ITU-T 勧告 G.107』で定義されている R 値を用いることとした。R 値は遅延、ジッター及びパケットロスなどの測定値から、VoIP の通話品質を数値評価するものであり、我が国の TTC 標準 JJ201.01 では、クラス A(固定電話並)は 80 以上、クラス B(携帯電話並)は 70 以上、クラス C(050 番号で始まる IP 電話並)は 50 以上と規定されている。今回の評価では、通信速度の低速なセンサーネットワークにおいても、クラス C レベルを満足することを目標とし評価を行うものとする。

ITU-T で公開されている R 値の計算プログラム を使用して遅延とロス率を変えた時の R 値の変化を図 4-3、図 4-4 に示す。図 4-3 から遅延に関しては 200ms を超えたあたりから R 値の減少が大きくなり、図 4-4 からパケットロスが 10%を超えると R 値は 50 を下回ることがわかる。

(<http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com12/emodelv1/index.htm>)

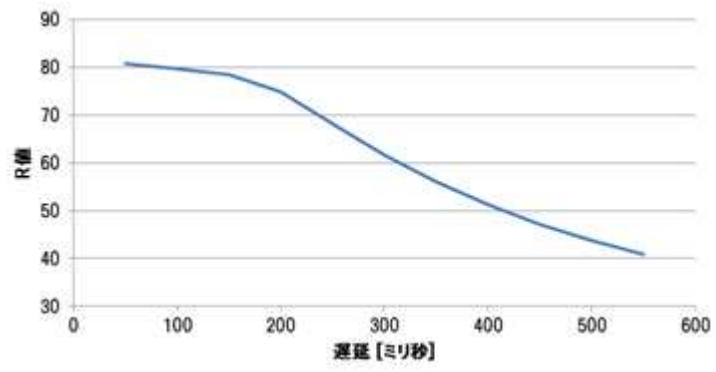


図 4-3. 遅延と R 値の関係

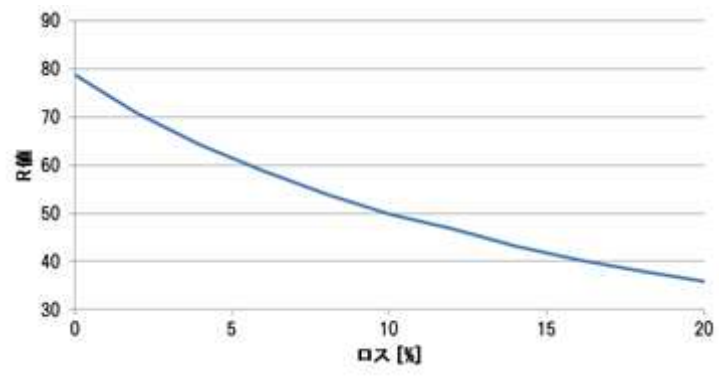


図 4-4. パケットロスと R 値の関係

## 4.2. 最適なコーデックとパラメータの選定

### 4.2.1. 測定条件

最適なコーデックとパラメータの評価の条件を表 4-2 に示す。

表 4-2. 最適コーデック/パラメータ評価の検証条件

項番	項目	パラメータ	備考
1	コーデック	G.711, G.729a	G.711: 64Kbps, G.729a: 8kbps
2	送信間隔	G.711 {40ms, 60ms} G.729a {40ms, 80ms, 120ms}	G.729a の送信間隔は最小間隔(40ms)と最大間隔(120ms)とその中間値(80ms)を評価した。
3	ホップ数	{1, 2, 3, 4, 5}	理論値条件値から最大 5 ホップとした。(参考資料 )
4	同時回線数	{1, 2, 3}	
5	測定時間	5 分	通話時間の平均 3 分前後から算出した。(H25 年度 総務省 情報通信白書より)
6	ACK 要求	なし	輻輳しにくい条件とするためなしとした。
7	デューティ制御	なし	

コーデック: VoIP で一般的に使われている G711, 729a とした。送信間隔の条件は G711 の場合は 40ms、60ms とし、G729a の場合は 40ms、80ms、120ms とした。

送信間隔: 理論的に実現可能な設定の最大間隔と最小間隔とその中間の値とした。

最大ホップ数: 5 ホップ、同時通話回線数は最大 3 回線とした。(参考資料 を参照)

1 回の測定時間: H25 年度 総務省 情報通信白書によると 1 回の通話時間の平均は 3 分程度であるとの報告を参考にその値よりも少し長い値として 5 分間とした。

Ack 要求: なし

デューティ制御: 有線での試験であることと、デューティ制御がない場合でのホップ数、同時通話の上限を測定する必要があるため、「なし」とした。

(参考資料 )

ホップ数と同時通話回線数の条件を 5 ホップで同時 3 回線までとした理由を以下に説明する。まず 400kbps の物理層のレートをもつ無線機での MAC スループットを算出する。この計算条件を表 4-3 に計算結果を図 4-5 に示す。理論値計算の検証のため実測したデータと比較してもほ



ば同等の値となっている。実測値の方がわずかに小さい値となるのは、理論値計算では装置の CPU 性能によって変わる処理時間を考慮していないためである。図 4-5 を見ると、小さいパケットを送信した場合にはスループットが小さくなっていることがわかる。これは、ペイロード長に対する PHY ヘッダ、MAC ヘッダの割合が大きくなるためである。次に VoIP パケットのサイズと使用帯域はコーデックの種類と送信間隔を決定すれば算出することが可能である。パケットサイズが決まると、その VoIP パケットを送ったときの 1 ホップのスループットを図 4-5 から読み解くことができる。1 ホップのスループットからマルチホップ時のスループットを算出するには、スループットは  $1/n$  ( $n$  はホップ数) で減少してするものとして計算する。マルチホップ時のスループットの値を VoIP の使用帯域で除算すれば、収容できる回線の上限数を求めることができる。この計算結果をまとめたものが表 4-4 となる。こうして求めたホップ数、同時通話回線数の理論上限値から今回のラボ内検証のホップ数は最大 5 ホップ、同時通話回線数は 3 回線と決定した。

表 4-3. MAC スループットの計算条件

項目	値	内容	備考
キャリアセンス時間	128us	電波法規定による	電波の使用状況を検知する仕組み
バックオフ時間	450us	実装では 0 ~ 900us のランダム値を選択	ランダムな待ち時間
ACK 応答時間	300us	Wi-SUN 規定では 300us ~ 1000us 以内	ACK(到達確認)を返信する時間
ACK 送信時間	720us	36 バイト送信時間	
データ送信後の休止時間	2ms	電波法規定による	
PHY/MAC ヘッダ	42Byte		IEEE802.15.4g で規定されたヘッダ

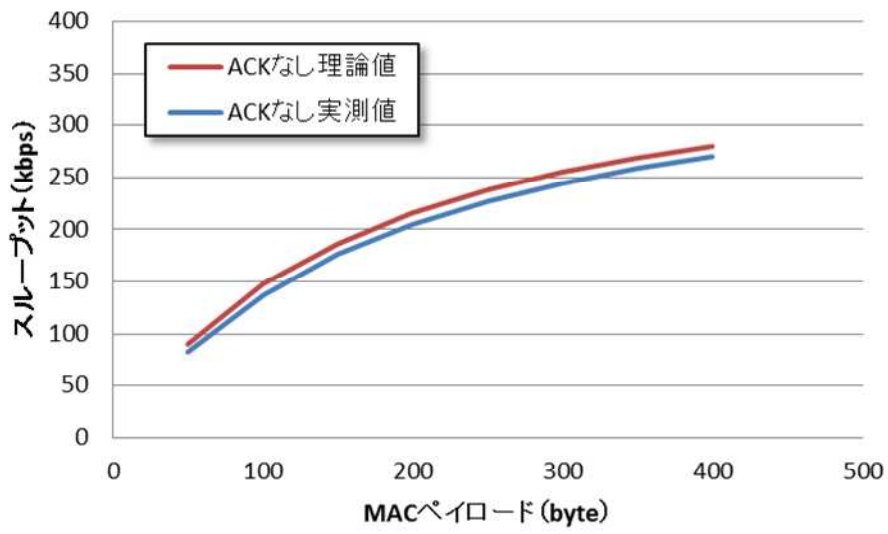


図 4-5. 送信ペイロード長とスループットの関係

表 4-4. 同時に收容できる回線数の上限値

コーデック 種別	パケット送信 間隔 (ms)	パケット サイズ (Byte)	使用 帯域 (kbps)	收容数 (1~5 はホップ数)				
				1	2	3	4	5
G.711	10	147	117.6	-	-	-	-	-
	40	387	77.4	1	-	-	-	-
	60	547	72.93	2	1	-	-	-
G.729a	10	77	61.6	-	-	-	-	-
	40	107	21.4	3	1	-	-	-
	60	127	16.93	5	2	1	1	-
	80	147	14.7	6	3	2	1	1
	100	167	13.36	7	3	2	1	1
	120	187	12.47	8	4	2	2	1

#### 4.2.2. 試験結果

##### 4.2.2.1. 同時通話回線数 1 回線の場合

(1)R 値

同時通話回線数が 1 回線の場合の R 値を図 4-6 に示す。



図 4-6. 同時通話 1 回線の場合の各コーデックの R 値

1 ホップの場合には G711、40ms の場合を除いて R 値は 70 以上となっている。特に G711、60ms の時は 80 以上の R 値という高い結果となっている。しかし、ホップ数が多くなるにつれ R 値は低下している。特に G711、60ms や G729a、40ms に関しては急激に R 値が低下している。5 ホップまで通話可能 (R 値 50 以上) であったのは、G729a、120ms とした場合だけであることから、「コーデック: G729a、送信間隔: 120ms」が音声データ伝送に最も適しているという結果となった。

(2) 詳細結果

遅延、パケットロス及びデューティの詳細結果を表 4-5 に示す。

表 4-5. 通話回線数 1 回線の時の測定結果

コーデック	送信間隔	ホップ数	ロス	遅延(s)	揺らぎ	R 値	Duty
G711	40	1	0.031	0.016	0.001	51	21
G711	60	1	0.002	0.015	0.001	86.5	19.3
G711	60	2	0.182	0.035	0.001	13.4	32.4
G729	40	1	0.012	0.006	0.001	75.5	7.3
G729	40	2	0.004	0.011	0.001	78.4	14.2
G729	80	1	0.000	0.006	0.000	79.5	4.7
G729	80	2	0.001	0.012	0.001	79	9.2
G729	80	3	0.046	0.017	0.001	63	8.8
G729	80	4	0.401	0.030	0.004	22	7.9
G729	80	5	0.910	0.032	0.003	9.5	5.4
G729	120	1	0.000	0.007	0.000	78.6	3.8
G729	120	2	0.003	0.014	0.001	77.1	7.5
G729	120	3	0.020	0.020	0.001	70.1	7.4
G729	120	4	0.050	0.027	0.001	60.2	7.4
G729	120	5	0.056	0.033	0.002	58.2	7.4

G711 を使用した場合と G729a の送信間隔 40ms で 2 ホップの通話を行った場合はデューティが 10%を超えるため、10%デューティ制限によって通話時間に制限が生じるが、それ以外は、連続して通話を行っても 10%デューティ制限による通話時間制限を行う必要がない結果となった。

#### 4.2.2.2. 同時通話回線数 2 回線の場合

(1)R 値

R 値の測定結果を図 4-7 に示す。

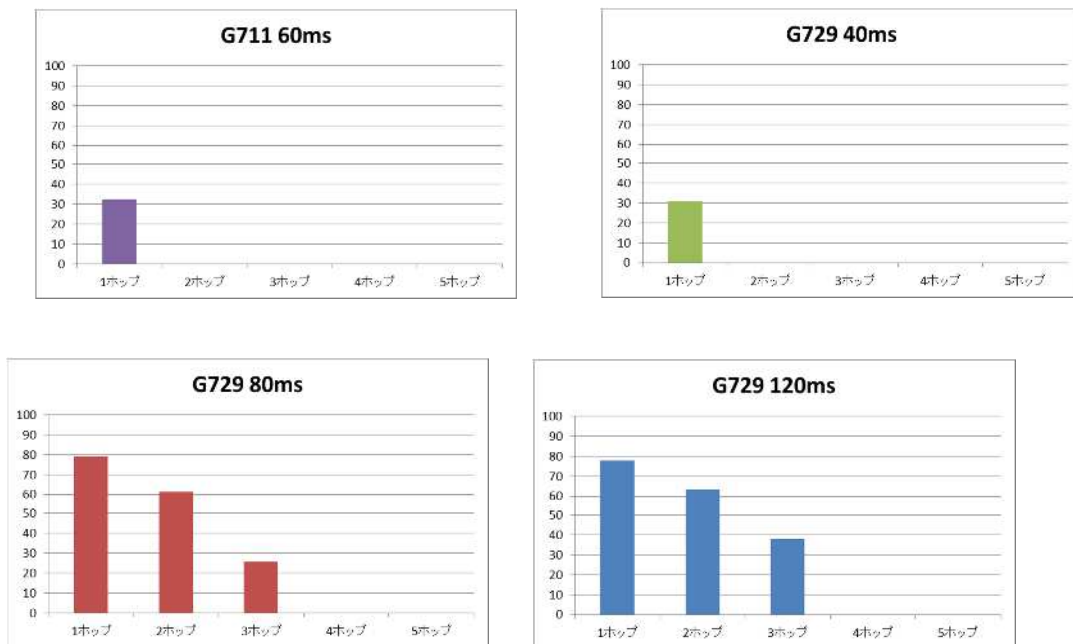


図 4-7. 同時通話 2 回線の場合の各コーデックの R 値

G729a の送信間隔 80ms、120ms を使用した場合は、R 値 50 以上を満足するものの、G711 や G729a の送信間隔 40ms では 1 ホップの時点で既に R 値 50 以下となっている。

3 ホップの通話ではすべてのコーデックで R 値は 50 以下となり基準値を満足していない。結果としては、回線の同時通話においては、G729a の 80ms 送信間隔及び 120ms 送信間隔のコーデックを用いて 2 ホップまでの通話が可能であり、音声コーデックの仕様としては、最も R 値の高い G729a の送信間隔 120ms を選定することとした。

(2) 詳細結果

遅延、パケットロス及びデューティの詳細結果を表 4-6 に示す。

表 4-6. 通話回線数 2 回線の時の測定結果

コーデック	送信間隔	ホップ数	ロス	遅延	揺らぎ	R 値	Duty
G711	60	1	0.067	0.020	0.002	32.6	38.1
G729	40	1	0.270	0.010	0.003	31	14.2
G729	80	1	0.000	0.007	0.001	79.3	9.2
G729	80	2	0.052	0.013	0.002	61.2	17.8
G729	80	3	0.333	0.021	0.003	25.8	15.6
G729	120	1	0.002	0.009	0.001	77.9	7.6
G729	120	2	0.041	0.015	0.001	63.3	14.8
G729	120	3	0.173	0.021	0.002	38	14.2

1 ホップの通話以外では、どのコーデックを用いてもデューティ 10%を超える結果となっている。G729a の送信間隔 120ms の場合には約 52kbps のデータが発生するため 1 回線あたり約 7.5% のデューティが必要になるが、デューティの測定結果も想定どおり 7.6%となっている。この結果、時間制限を設けずに 2 回線の同時通話を行うためにはデューティ制限を 15%以上にすることがある。

#### 4.2.2.3. 同時通話回線数 3 回線の場合

(R 値)

同時通話回線数が 3 回線の場合の R 値の測定結果を図 4-8 に示す。

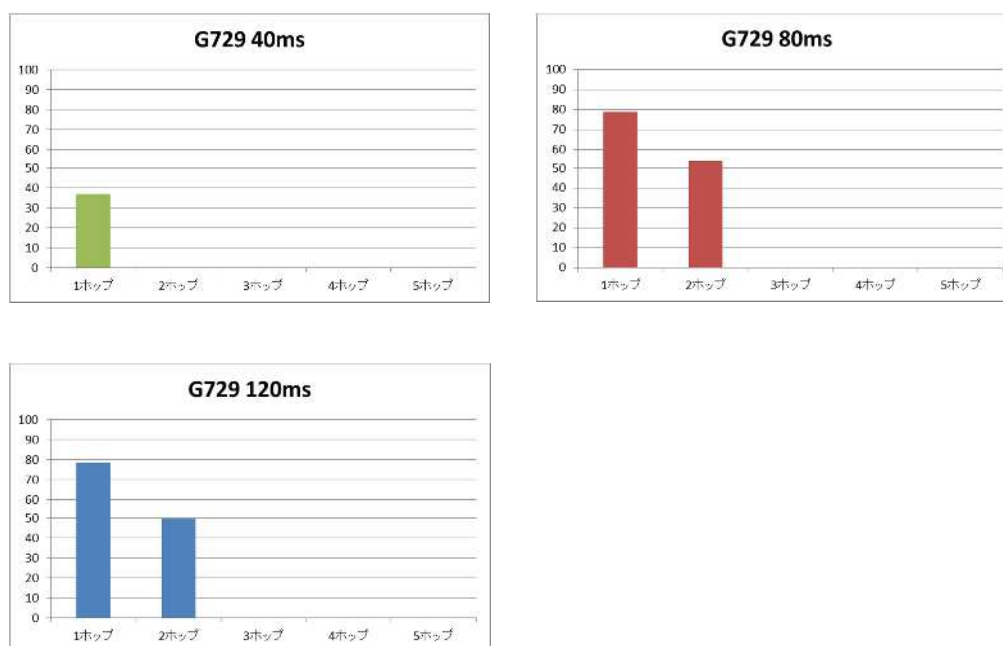


図 4-8. 同時通話 3 回線の場合の各コーデックの R 値

1 ホップにおいて、R 値 50 以上を満足するのは、G729 の送信間隔が 80ms 及び 120ms の場合のみであった。2 ホップの通話では G729 の送信間隔が 80ms や 120ms の場合において 2 回線の同時通話時では 60 あった R 値が 3 回線通話では 50 付近まで下がり、品質が大きく低下している。

(2) 詳細結果

R 値、遅延、パケットロス、揺らぎ及びデューティの詳細結果を表 4-7 に示す。

表 4-7. 通話回線数 3 回線の時の測定結果

コーデック	送信間隔	ホップ数	ロス	遅延	揺らぎ	R 値	Duty
G729	40	1	0.203	0.008	0.003	37	20.9
G729	80	1	0.001	0.006	0.001	78.9	13.7
G729	80	2	0.083	0.014	0.002	53.8	26.1
G729	120	1	0.000	0.008	0.001	78.5	11.2
G729	120	2	0.098	0.015	0.002	49.7	21.4

全てのコーデックでデューティが 10%を超えているため、通話時間の制限が課せられる。また、G729a の送信間隔 120m を用いた 2 ホップ 3 回線の同時通話では、10%近いパケットロスが発生し、わずかではあるが基準とした R 値 50 を下回っている。そのため、仮にデューティ制限がなかったとしても、3 回線の同時通話ではクラス C の通話品質とはならないという結果が得られた。

#### 4.3. Ack 応答有無の比較

##### 4.3.1. 測定条件

Ack 応答有無の比較の試験条件を表 4-8 に示す。

表 4-8. Ack 応答有無の比較の条件

項番	項目	パラメータ	備考
1	コーデック	G.729a	G.729a: 8kbps
2	送信間隔	120ms	4.2 の結果に基づく値
3	ホップ数	{1, 2, 3, 4, 5}	
4	同時回線数	{1, 2, 3}	
5	測定時間	5 分	
6	Ack 要求	{あり、なし}	
7	デューティ制御	なし	

コーデック及び、送信間隔は 4.2.2 の試験結果から選定した G729a 送信間隔 120ms とし、Ack については要求の条件を「あり」、「なし」の 2 パターンとした。それ以外の試験項目に関しては、4.2 と同じ条件とした。この試験条件において、Ack 要求の「あり」と「なし」の違いによる通話品質を評価した。



### 4.3.2. 測定結果

#### (1) R 値

Ack 応答有無の比較の測定結果を図 4-9、図 4-11 及び図 4-11 に示す。



図 4-9. 同時通話 1 回線の時のホップ数と R 値の関係

表 4-9. 同時通話 1 回線時のホップ数と R 値の関係

Ack	ホップ数	ロス	遅延	揺らぎ	R 値	Duty
なし	1	0.000	0.007	0.000	78.6	3.8
なし	2	0.003	0.014	0.001	77.1	7.5
なし	3	0.020	0.020	0.001	70.1	7.4
なし	4	0.050	0.027	0.001	60.2	7.4
なし	5	0.056	0.033	0.002	58.2	7.4
あり	1	0.001	0.008	0.003	78	4.2
あり	2	0.001	0.014	0.002	78.1	7.6
あり	3	0.018	0.022	0.003	70.9	7.7
あり	4	0.045	0.030	0.005	61.4	7.8
あり	5	0.051	0.042	0.009	58.8	8.1

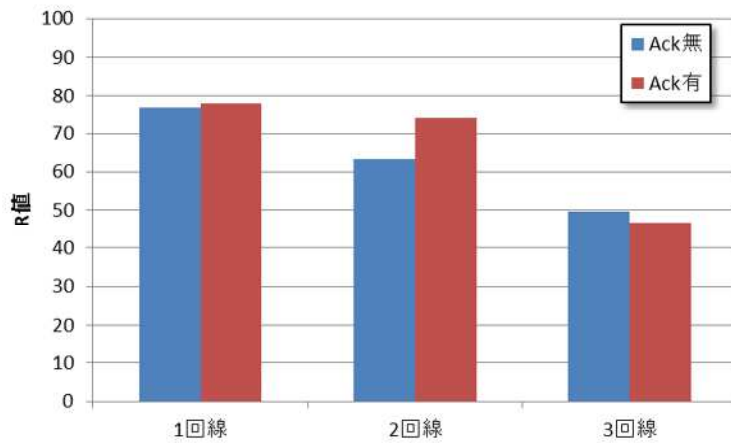


図 4-10. 2 ホップ時における複数通話回線の R 値の比較

表 4-10. 2 ホップ時における複数通話回線の R 値の比較

Ack	回線数	ロス	遅延	揺らぎ	R 値	Duty
なし	1	0.003	0.014	0.001	77.1	7.5
なし	2	0.041	0.015	0.001	63.3	14.8
なし	3	0.098	0.015	0.002	49.7	21.4
あり	1	0.001	0.014	0.002	78.1	7.6
あり	2	0.010	0.015	0.003	74.1	14.9
あり	3	0.109	0.033	0.021	46.7	24.6

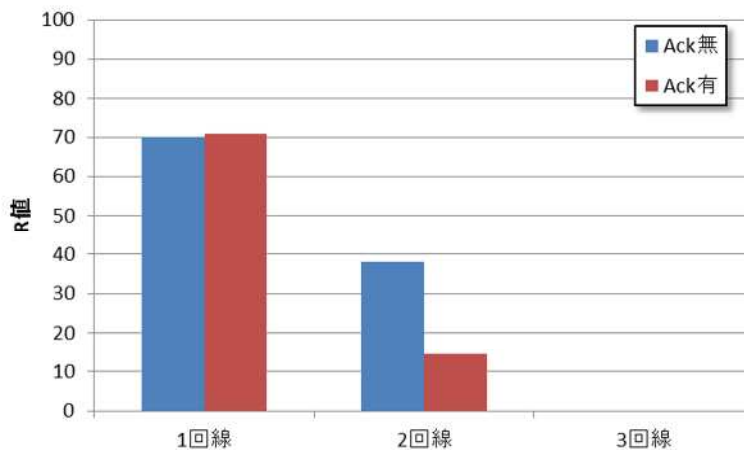


図 4-11. 3 ホップ時における複数通話回線の R 値の比較

表 4-11. 3 ホップ時における複数通話回線の R 値の比較

Ack	回線数	ロス	遅延	揺らぎ	R 値	Duty
なし	1	0.020	0.020	0.001	70.1	7.4
なし	2	0.173	0.021	0.002	38	14.2
あり	1	0.018	0.022	0.003	70.9	7.7
あり	2	0.534	0.043	0.021	14.6	21.8

1 回線の通話時(図 4-9)には 1 ホップ以外の場合に「Ack あり」の方がわずかではあるが、R 値が高くなっている。2ホップで3回線の同時通話(図 4-10)や、3ホップで2回線の同時通話(図 4-11)では、「Ack なし」の方が高い R 値となっている。この結果から輻輳が起るようなトラフィックが条件の場合には「Ack なし」とすることで音声品質を向上できるという結果が得られた。このように、音声データを「Ack なし」にすることで、音声品質は向上しているが、R 値 50 を超えるまでの改善には至らないという結果となった。逆に通話回線数が 1 回線の時には、輻輳するほどのトラフィックではないため、データを再送することでパケットロスが減ることによる R 値改善の効果が表れている。

#### 4.4. デューティ制御方式の比較

##### 4.4.1. 測定条件

デューティ制御方式の比較の試験条件を表 4-12 に示す。この条件下でパケット毎制御と 1 時間毎制御の 2 つのデューティ方式の違いによる通話品質を評価する。

表 4-12. デューティ制御方式の比較の試験条件

項番	項目	パラメータ	備考
1	コーデック	G.729a	G.729a: 8kbps
2	送信間隔	120ms	最適パラメータの評価で最も性能が良かったパラメータを選定した
3	ホップ数	2	3 回線が接続可能なホップ数を選定した
4	同時回線数	{1, 2, 3}	
5	測定時間	10 分	1 時間あたりの 10%デューティ(6 分)より長い時間とした
6	Ack 要求	なし	

7	デューティ制御	{パケット毎制御、 1時間毎制御}	
---	---------	----------------------	--

#### 4.4.2. 測定結果

##### (1) R 値

2 ホップ環境において通話回線数を変化させた時の R 値を図 4-12 に示す。

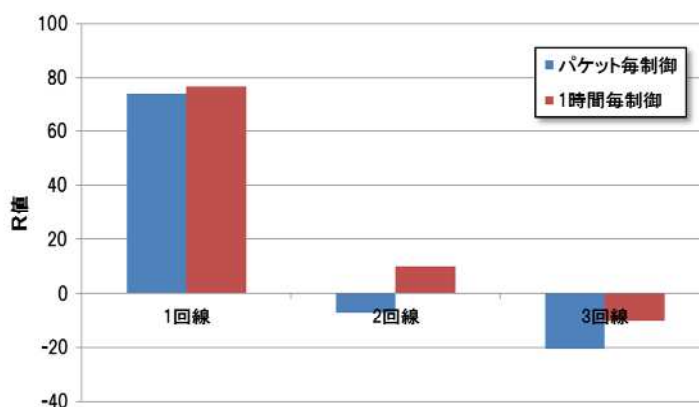


図 4-12. 2 ホップ時におけるデューティ制御方式の比較

1 回線通話では、パケット毎制御方式と 1 時間毎制御両方式共に 10 分の連続通話において、R 値 70 以上の高品質な通話が可能であった。2 回線通話、3 回線通話では R 値は 0 付近の値となり通話不可能であった。デューティ 10% 制限環境では、パケット毎制御方式と 1 時間毎制御方式どちらも、2 回線の 10 分の通話は不可能という結果となった。

この時の遅延と各無線装置のデューティの時間変化データを示したものが図 4-13 ~ 図 4-16 である。

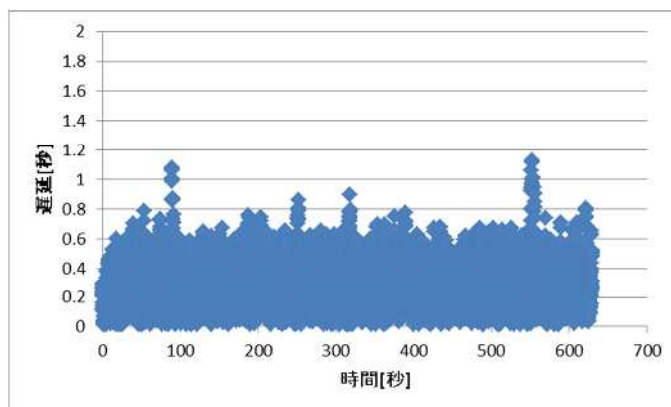


図 4-13. パケット毎制御方式の遅延の時間変化

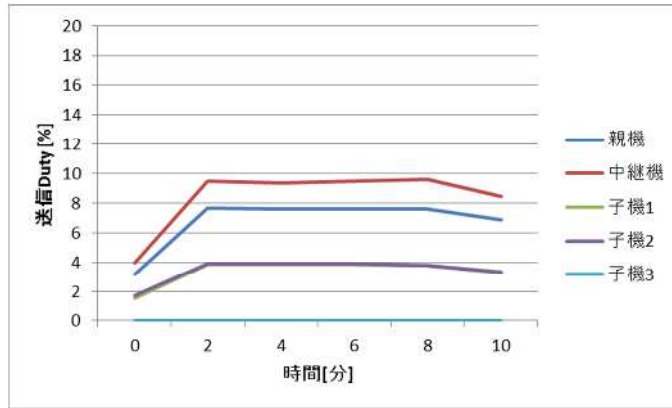


図 4-14. パケット毎制御方式のデューティの時間変化

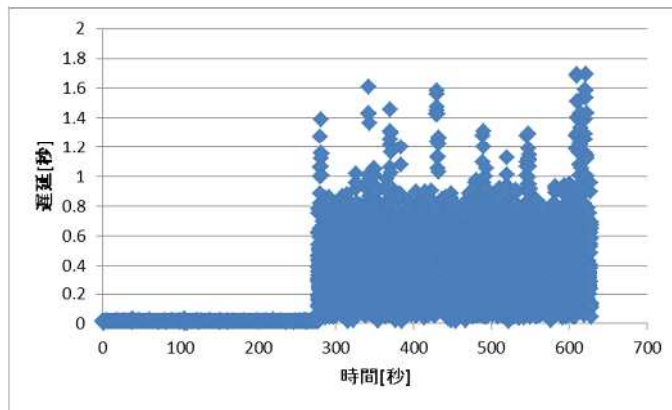


図 4-15. 1 時間毎制御方式の遅延の時間変化

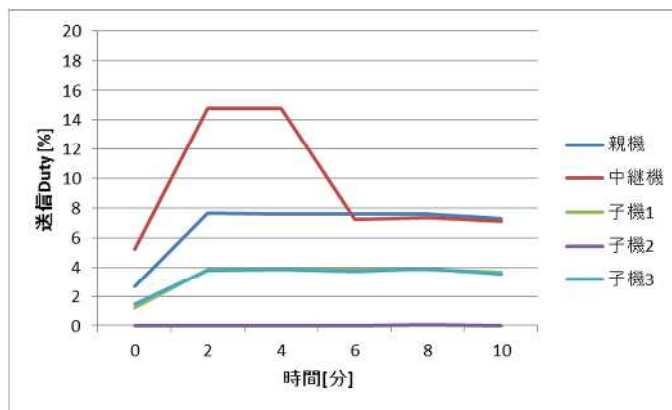


図 4-16. 1 時間毎制御方式のデューティの時間変化

パケット毎制御を用いた図 4-13 及び、図 4-14 では測定期間中一定の遅延とデューティとなっているのに対して、1 時間毎制御方式の結果を用いた図 4-15 及び図 4-16 では 280 秒あたりを境に遅延が急増し、中継器のデューティが急激に低下していることがわかる。これは送信デューティ制御の切り替わりによるものである。現行のシステムでは送信デューティが一定以上超過

すると、その後は送信デューティを 7.5%に制限するようにしている。つまり、4 分間デューティが 15%の状態が続くと、その後 8 分間は送信デューティを 7.5%まで制限することで、この 12 分間の平均の送信デューティを 10%とする動作となる。この動作のため、図 4-15 では 280 秒付近で急激に遅延が増加している。1 時間毎制御の方は通話開始してから 280 秒までは高い通話品質であったと考えられる。そこで、1 回の通話の平均時間とされている 3 分(180 秒)までのデータで R 値の集計を行うこととした。その結果の R 値を図 4-17 に示し、遅延、パケットロス、揺らぎ及びデューティの値を表 4-13 に示す。

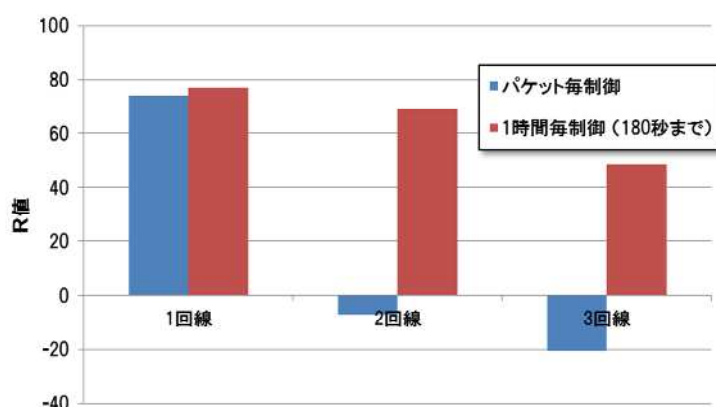


図 4-17. 2 ホップ時におけるデューティ制御方式の比較(180 秒まで)

表 4-13. デューティ制御方式の比較の検証結果

Duty	回線数	ロス	遅延	揺らぎ	R 値	Duty
パケット毎制御	1	0.008246	0.028197	0.024831	74.2	7.5
パケット毎制御	2	0.386	0.284218	0.135666	-7.1	9.6
パケット毎制御	3	0.596169	0.370619	0.146479	-20.5	9.7
1 時間毎制御	1	0.003582	0.013929	0.0006	76.8	7.5
1 時間毎制御	2	0.298306	0.164939	0.239669	9.8	14.8
1 時間毎制御	3	0.546253	0.25069	0.290233	-10.2	18.8
1 時間毎制御(180 秒まで)	1	0.003021	0.013934	0.000677	77.1	7.5
1 時間毎制御(180 秒まで)	2	0.022959	0.01393	0.000801	69.3	14.8
1 時間毎制御(180 秒まで)	3	0.184029	0.01939	0.003384	48.5	18.8

R 値を示した図 4-17 では 2 回線の通話時に R 値は約 70 であり、3 回線における R 値は基準値である 50 に近い 49 が得られている。この結果から 1 時間デューティ制御方式を用いれば、デューティ 10%の制限下においても 2 回線の同時通話が約 4 分可能であるという結果が得られた。

#### 4.5. 机上検討（ラボ内試験）のまとめ

ラボ内試験で行った結果をまとめる。

(1)最適なコーデック/パラメータはコーデックを G729a、パケット送信間隔を 120ms とした場合に、無線センサーネットワーク上で最も高い通話品質となった。1 回線の通話では 5 ホップ、2 回線の通話では 2 ホップまで R 値 50 以上の通話品質を確保できた。

(2)Ack 応答有無の比較(衝突、干渉による再送パケットの増大)の比較試験では、高負荷条件(2ホップ3回線通話、3ホップ2回線通話)ではAckなしとした方が良好な結果が得られたが、R 値は 50 以下となった。R 値 50 以上を実現できる条件においては、Ack ありとした方が高い R 値となった。そのため、Ack 応答はありとした方が高い通話品質を実現できる。

(3)デューティ制御方式の比較(伝送遅延の増大)の試験では1回線時はデューティ制御方式によらず R 値 70 以上の高品質な連続通話が可能であった。2 回線の通話では 1 時間毎制御のデューティ制御方式を用いることで、4 分間に時間を限定して R 値約 70 の高品質な連続通話が可能であった。そのため、複数回線の通話を行う場合にはデューティ制御方式として、今回評価したような 1 時間当たりの送信時間を管理する方式を用いる必要がある。

(4)G729a、パケット送信間隔を 120ms のコーデックを用いた場合には 1 回線の通話あたり 7.5%のデューティとなるため、1 回線での運用であれば、10%デューティ制限下でも連続通話が可能である。2 回線の通話においては、現行のシステム実装では 4 分の連続通話後は 8 分の休止を行うなどの運用ルールを定めることで実現可能となる。利便性向上のために 2 回線での連続通話を実現するためには 10%のデューティ制限の緩和が望ましい。

## 5. 実証試験

### 5.1. 実証試験の概要

本章では、4章で述べたラボ内試験結果をフィールドにおいて検証するための試験を行う。

#### 5.1.1. フィールド試験項目

フィールド試験項目とその試験概要を表 5-1 に示す。

表 5-1. フィールド試験の試験項目

項番	試験項目	試験概要
1	電波伝搬フィールド測定	マルチホップ経路の構築を可能としておくために、無線局間の通信試験を行い、パケットエラー率及び受信電界強度を測定する。
2	マルチホップ試験	1 から 5 ホップまでのマルチホップ環境において、回線数、ホップ数に対するパケットロス/遅延/揺らぎの測定結果から R 値を算出し、ラボ内試験結果と比較する。
3	デューティ制御方式試験	2 ホップ 2 回線の環境において、デューティ制御方式の違いによるパケットロス/遅延/揺らぎを測定結果から R 値を算出し、ラボ内試験結果と比較する。

#### 5.1.2. フィールド試験環境と測定手順

##### (1) 試験環境

試験環境は親局と子局との通信を複数の中継局を経由することを可能とする構成とした。まず親局を屋内施設である多目的集会所に設置し、子局を自動車に設置し、それぞれの局に VoIP-GW と電話機を接続する。次に、子局を意図した中継局を中継するように移動することで、マルチホップ環境を構築する。本構成を図 5-1 に示す。



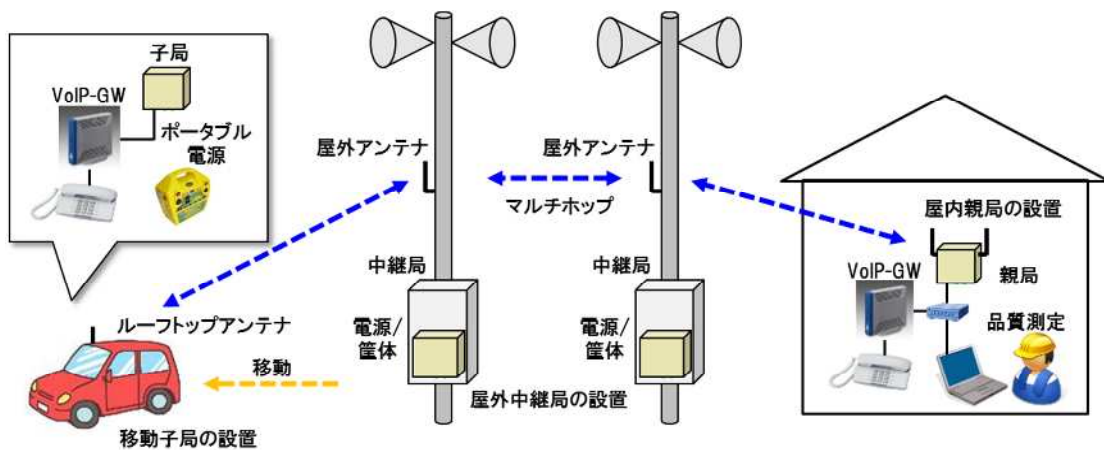


図 5-1. フィールド試験の構成

屋内親局の設置の様子を、移動子局の設置の様子を示す。



図 5-2. 屋内親局設置の様子



図 5-3. 移動子局設置の様子

## (2) 使用機器の仕様

フィールド試験に用いた機器の仕様を表 5-2 に示す。

表 5-2. 機器の仕様

機器名称	メーカー	型番
VoIP-GW	OKI	BV100-SIP
無線局	OKI	TD8010C
電話機	OKI	パロル ix-2
ルーフトップアンテナ	OKI	MH920-Node-ANT<R>
屋外アンテナ	日本アンテナ	SL-9300C
ポータブル電源	パワーコンボ	PG-521SP

## (3) 試験場所と試験期間

試験場所: 岩手県大上閉伊郡大槌町

試験期間: 2014 年 11 月 10 日(月)から 13 日(木)まで

## (4) 測定手順

フィールド試験の手順を以下に示す。

- 1) マルチホップ環境と想定される場所を選定し、中継局間の電波伝搬測定を行い、電波強度の測定及びパケットエラー率を測定する。
- 2) 電波強度の測定結果より、所望するマルチホップ環境となるように子局を移動し、親局と子局間の音声通話を行い、マルチホップ環境における音声品質を測定する。
- 3) また 2 ホップ環境においては、複数回線通話時のデューティ制御方式について、パケット毎制御方式と 1 時間毎制御方式との比較評価を実施する。

なお、測定には、親局:1 台、中継局:5 台、移動局:2 台、測定用 PC:2 台を用いた。

### 5.1.3. フィールド試験場所及び試験経路

フィールド試験を行う試験場所及び試験経路を図 5-4 に示す。

親局は多目的集会所に設置し、屋外中継局はA～Eの5箇所に設置した。A～E間の距離は、親局-A間:約160m、A-B間:約440m、B-C間:約880m、C-D間:約420m、A-E間:約1620mとなる。また子局を移動することで、2ホップ～5ホップ試験の環境を構築することとした。



図 5-4. フィールド試験場所と試験経路

なお、図中の赤丸は屋内親局を、緑丸は屋外中継局を、青四角は移動子局の設置場所を示している。

## 5.2. 電波伝搬フィールド測定

図 5-4 の試験機器の設置場所で、安定した 1 から 5 ホップのマルチホップ環境が構築可能どうかを確認するために、各中継局間で電波伝搬の測定を行った。電波伝搬測定は、測定用のアプリケーションを無線局に実装し、通常時とは異なる動作とすることで測定を可能としている。この電波伝搬測定に用いた無線局の設定パラメータを表 5-3 に示す。

表 5-3. 電波伝搬測定の設定パラメータ

項番	項目	パラメータ	備考
1	データサイズ	200Byte	音声データと同程度のサイズとした
2	送信間隔	100ms	測定時間が最短となる間隔とした
3	送信回数	1000 パケット	

### 5.2.1. 測定手順

各中継局に表 5-3 に示した測定パラメータを設定し、以下の手順で電波伝搬の測定を行った。測定手順の様子を図 5-5 に示す。

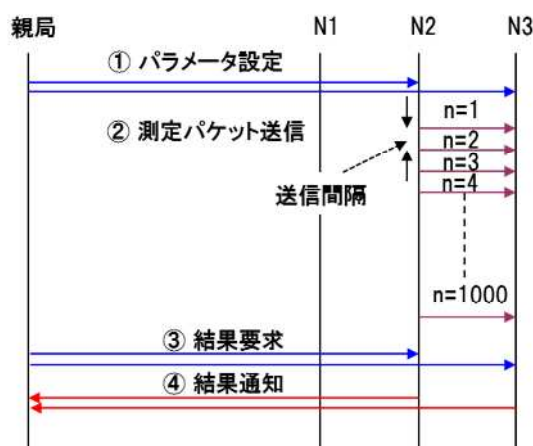


図 5-5. 電波伝搬の測定手順

- 1) 屋内親局から屋外中継局に対して送信局、受信局としてのパラメータを設定する。
- 2) 送信局から受信局に対して測定用のパケットをブロードキャストで送信し、受信局は受信電界強度とパケット受信率を測定する。
- 3) 屋内親局から各屋外中継局に対して測定結果の要求コマンドを送信する。
- 4) 各屋外中継局からは、測定した受信電界強度とパケット受信率を屋内親局に送信する。

各屋外中継局間の受信電界強度は、1000 パケットを送受信した時の値とし、取得するデータは障害物やフェージングなどの影響により変動するため、平均値、最大値、最小値を測定することとした。また、送信した 1000 パケットの受信率も測定した。

なお図中の N は無線局の番号を、n はパケットのシーケンス番号を示している。

## 5.2.2. 測定結果

各屋外中継局の電波伝搬の測定結果を図 5-6 に示す。

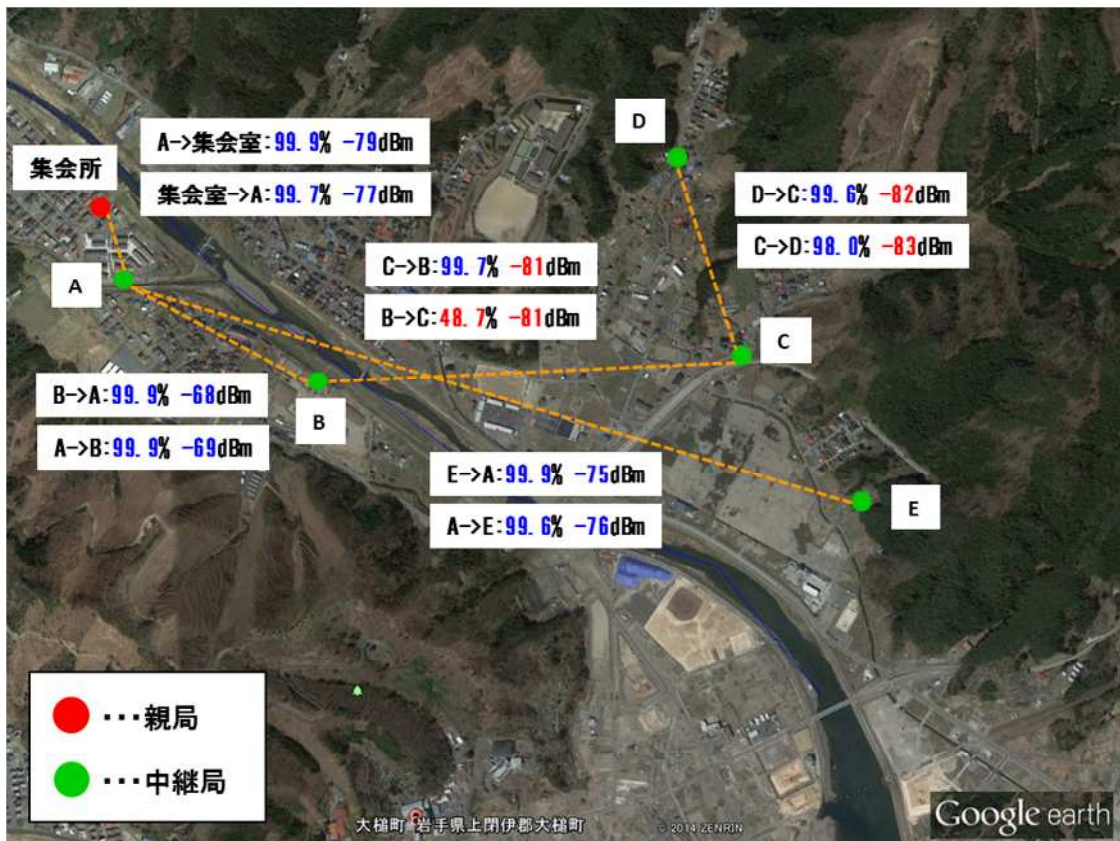


図 5-6. 電波伝搬の測定結果

図中の白地枠内の情報は、パケット受信率(%)及び、受信電界強度(dBm)を示している。パケット受信率が 90%以上場合は青字に、90%未満の場合は赤字で示した。また受信電界強度が -80dBm 以上の場合は青字に、-80dBm 未満の場合は赤字で示している。

図 5-6 の結果より、パケット受信率は中継局 B から C の間が、受信電界強度については、中継局 B-C 間及び C-D 間が悪くなっている。

これは B-C 間、C-D 間が見通し外の環境にあるためだと推測される。本来であれば、B-C 間の中間地点に中継局を設置可能であるが、追加の中継局を設置するとその中継局にすべての無線局が接続し、最大 2 ホップのマルチホップ環境しか構築できなかった。そのため、本フィールド試験においては、図 5-6 に示す機器設置とした。

なお、設置場所が見通し環境か見通し外環境によって異なるが、中継局間の電波強度の変動幅は、最小で 2dB、最大で 10dB、平均で 4.5dB であった。

### 5.3. Ack 応答有無の比較

図 5-4 で示したフィールド試験場所を用いて、フィールドでのマルチホップ試験を実施した。本節では、測定条件と測定結果及び、ラボ内試験との比較結果を示す。

#### 5.3.1. 測定条件

マルチホップ環境での試験項目及びパラメータ条件を表 5-4 に示す。

表 5-4. マルチホップ試験の検証条件

項番	項目	パラメータ	備考
1	コーデック	G.729a	・G.729a: 8kbps
2	送信間隔	120ms	・4.2 のラボ内試験で最も性能が良かったパラメータを選定した
3	ホップ数	1 から 5 ホップ	・ラボ内試験と同じ ・ただし、ラボ内試験で 2 回線 3 ホップは R 値が 50 以下であったため、同時回線数の評価を 2 ホップとした
4	同時回線数	1 回線、2 回線	・4.2.2.3 のラボ内試験で 3 回線は R 値が 50 以下であったため除外した
5	測定時間	5 分	・ラボ内試験と同じ
6	ACK 要求	「あり」又は「なし」	
7	デューティ制御	1 時間毎制御	

#### 5.3.2. 測定結果

1 回線時において、ホップ数を 1 から 5 まで変更した時のパケットロスと遅延及び遅延揺らぎとデューティの測定結果を表 5-5 に示す。また R 値についてグラフ化したものを図 5-7 に示す。

表 5-5. 1 回線時におけるホップ数の評価

ホップ数	Ack 有無	ロス (%)	遅延(ms)	揺らぎ(ms)	Duty (%)	R 値
1	無	0.2	7	3	3.8	77.4
	有	0	7	3	3.8	78.3
2	無	1.1	13	3	7.5	73.8
	有	2	14	4	7.8	70
3	無	7.1	20	2	7.3	55.1
	有	2.9	21	4	8.2	66.7
4	無	11	28	3	7.2	46.8
	有	10.3	28	4	7.3	48.2
5	無	71	43	7	5	10.3
	有	48	78	165	12.5	12.1

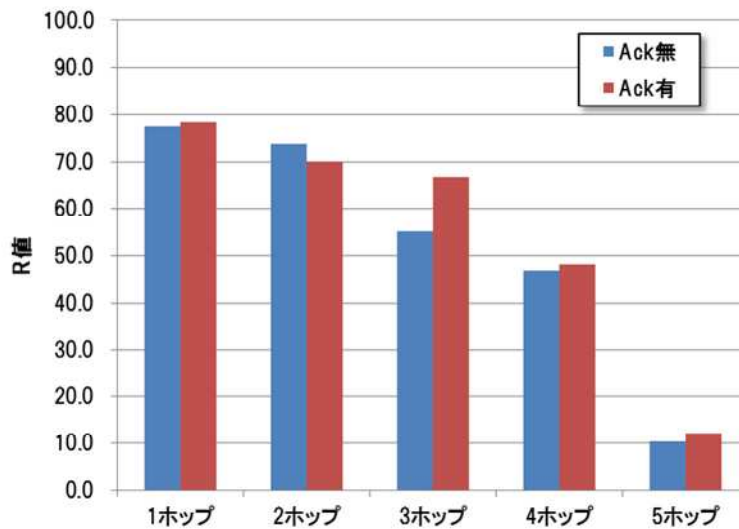


図 5-7. 1 回線時におけるホップ数の評価

表 5-5 の結果より、ホップ数が増加するにつれて、パケットロス率や遅延が増大していることが分かる。

図 5-7 の縦軸は 5 分間の測定時間の R 値であり、横軸はホップ数である。図 5-5 よりホップ数が増加するにつれて R 値が減少していることが分かる。一方、Ack 要求においては、トラフィックが多い場合は Ack 要求が「あり」の方が全体的に高い R 値が得られたものの、5 ホップ時の R 値は 4 ホップ時と比較して 1/4 程度まで悪化している。この要因としては、5.2.2 の電波伝搬測定結果から推測すると、受信電界強度が低い値の経路を経由しているためだと考えられる。

次に同時回線数における 2 ホップ時におけるパケットロスと遅延及び遅延揺らぎとデューティの測定結果を表 5-6 に示す。また R 値についてグラフ化したものを図 5-8 に示す。

表 5-6. 同時回線数における 2 ホップ時の評価

回線数	Ack 有無	ロス (%)	遅延(ms)	揺らぎ(ms)	Duty (%)	R 値
1	無	1.1	13	3	7.5	73.8
	有	2	14	4	7.8	70
2	無	15.5	17	2	13	40.5
	有	3	23	9	16	66.4

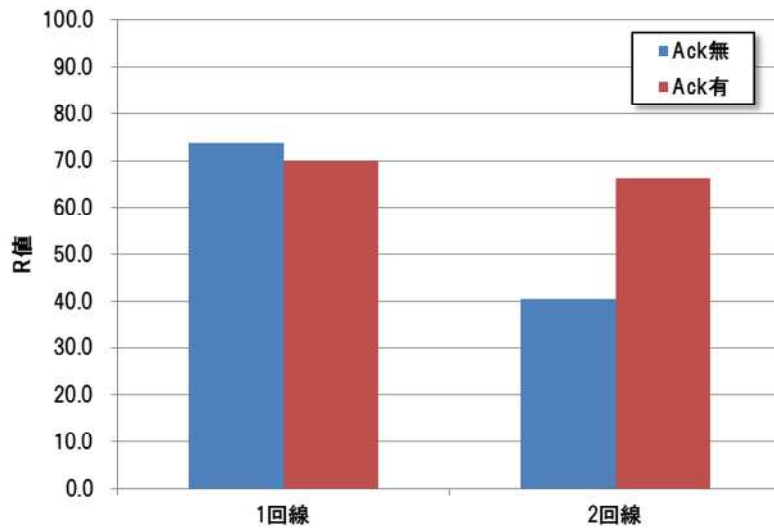


図 5-8. 同時回線数における 2 ホップ時の評価

表 5-6 の結果より、同時回線数が増加するとパケットロスや遅延が増加し、結果として R 値が減少していることが分かる。

図 5-8 の横軸は同時接続の回線数であり、1 回線と比べて 2 回線の方が送信されるパケット数が増加するため、パケット衝突によるロスが増大し、R 値が減少している。

また 2 回線時の評価においては、ACK 無しよりも ACK 有りの方が R 値が高い。これはパケット衝突時に ACK による再送を行うことで、パケットロス率が低下しているためである。この時、ACK 有りの方が遅延や揺らぎは大きくなるが、図 4-3 に示した遅延と R 値の関係から、数ミリ秒の遅延では R 値に大きな影響を与えないため、ACK 有りの方が高い R 値が得られると言える。



### 5.3.3. ラボ内試験との比較

マルチホップ数に関する試験において、4.3 でのラボ内での試験結果とフィールドでの試験結果を比較する。1 回線時における ACK 要求「なし」を図 5-9 に、1 回線の ACK 要求「あり」を図 5-10 に、2 ホップ時の ACK 要求「なし」を図 5-11 に、2 ホップ時の ACK 要求「あり」を図 5-12 に示す。

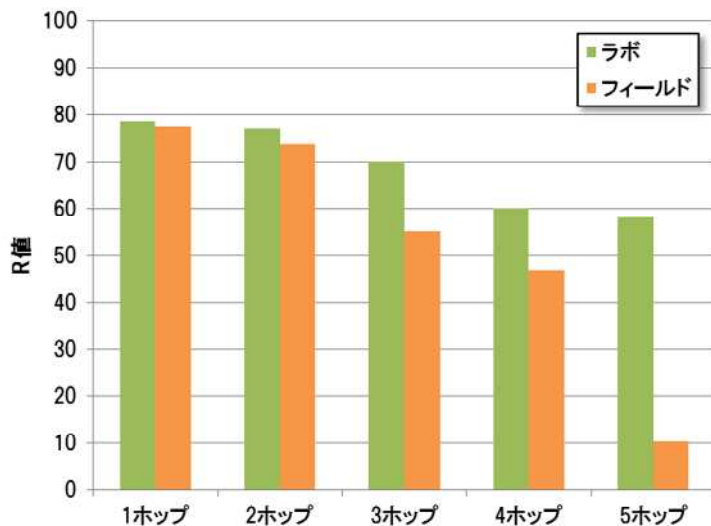


図 5-9. 1 回線の ACK 無

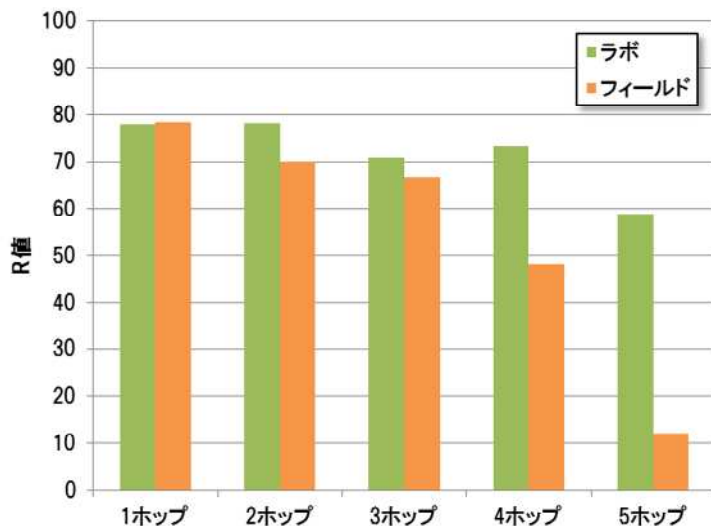


図 5-10. 1 回線の ACK 有

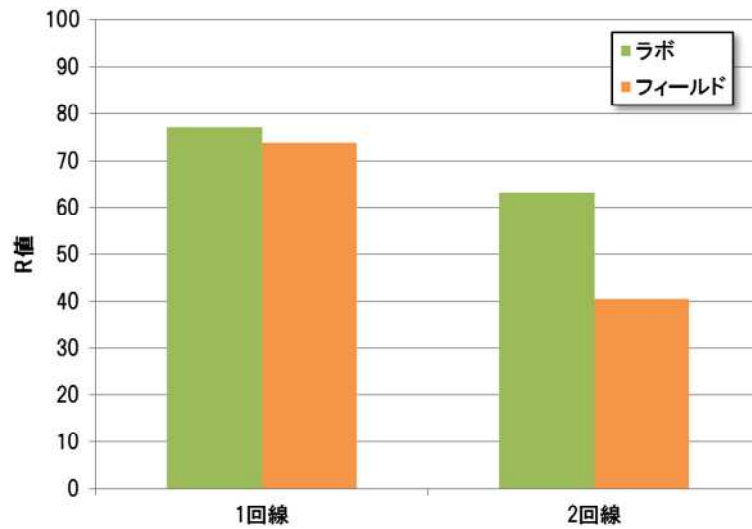


図 5-11. 2 ホップの ACK 無

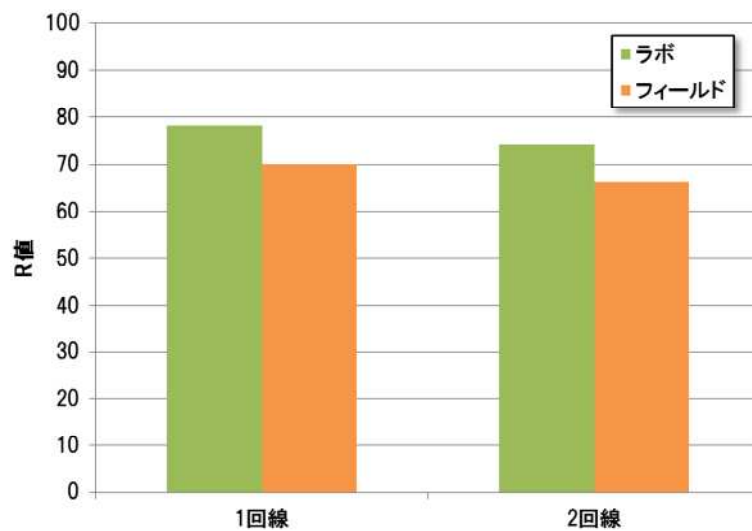


図 5-12. 2 ホップの ACK 有

図 5-10 の 1 ホップ時の結果を除いて、ラボ内の試験よりもフィールドの試験の R 値が低下している。この理由としてフィールド試験では、屋外環境でのリンク品質の変動や隠れ端末の影響があるため、パケットエラー率が高くなり、R 値が低下したものと推測される。

ただし、図 5-9 と図 5-10 に示すように、フィールド試験での 3 ホップ時の R 値は、ACK 無し時は 55、ACK 有り時は 66 と 50 以上である。そのため、屋外環境によるリンク品質の変動や隠れ端末によるパケットロスを考慮しても、屋外環境では 3 ホップまではクラス C の通話品質を維持した音声データ伝送が可能であると言える。

#### 5.4. デューティ制御方式の比較

ここでは、1 パケット毎にデューティ 10%を守るような送信待機を行う「パケット毎制御方式」と 1 時間あたりの送信時間の総和をカウントし、制限内であれば連続送信を可能としつつ、デューティを超えると送信不可とする「1 時間毎制御方式」の 2 種類の方式について、測定条件と測定結果及びラボ内試験との比較結果を示す。

##### 5.4.1. 測定条件

デューティ制御方式の測定条件を表 5-7 に示す。

表 5-7. デューティ制御試験の測定条件

項番	項目	パラメータ	備考
1	コーデック	G.729a	G.729a: 8kbps
2	送信間隔	120ms	4.4 のラボ内試験と同じ
3	ホップ数	2	4.4 のラボ内試験と同じ デューティ測定にホップ数は依存しないため 2 ホップとした
4	同時回線数	1 回線、2 回線、 3 回線	
5	測定時間	10 分	4.4 のラボ内試験と同じ
6	Ack 要求	あり	Ack ありの方が R 値が高いため
7	デューティ制御	パケット毎制御、 1 時間毎制御	

##### 5.4.2. 測定結果

2 ホップ環境における同時回線数の変化に対するパケットロスと遅延及び遅延揺らぎとデューティについて、10 分間測定した結果を表 5-8 に示す。また R 値についてグラフ化したものを図 5-13 に示す。

表 5-8. 2 ホップの測定結果(10 分間)

回線数	デューティ制御	ロス (%)	遅延(ms)	揺らぎ(ms)	Duty (%)	R 値
1	パケット毎	0.8	38	38	7.7	73.4
	1 時間毎	3.2	14	4	8	66.3
2	パケット毎	42	384	165	9.3	-15.8
	1 時間毎	20	96	178	16.7	26.3

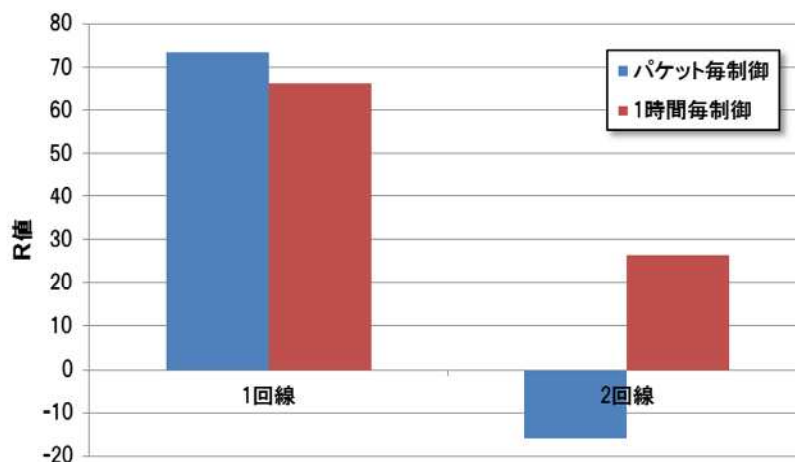


図 5-13. 2 ホップの測定結果(10 分間)

表 5-8 の結果より、1 回線時と 2 回線時の結果を比較すると、2 回線時の方がパケットロスや遅延、揺らぎが大幅に悪化していることが分かる。特にパケット毎制御方式は 1 時間毎制御と比較して、パケット再送時に送信時間の 9 倍の時間は次のパケットを送信できないため、より遅延が大きくなっている。

図 5-13 の横軸は同時回線数を、縦軸は R 値を示している。パケット毎制御及び 1 時間毎制御の両方式においても 2 回線時の R 値は 50 以下であり、クラス C の音声品質を維持できていないことが分かる。

次に 2 ホップ環境で同時回線数の変化に対するパケットロスと遅延及び遅延揺らぎとデューティについて、3 分間測定した結果を表 5-9 に示す。また R 値についてグラフ化したものを図 5-14 に示す。

表 5-9. 2 ホップの測定結果(3 分間)

回線数	デューティ制御	ロス (%)	遅延(ms)	揺らぎ(ms)	Duty (%)	R 値
1	パケット毎	0.8	38	38	7.7	73.4
	1 時間毎	2	14	3	7.4	69.5
2	パケット毎	42	384	165	9.3	-15.8
	1 時間毎	3	23	9	16.7	66.4

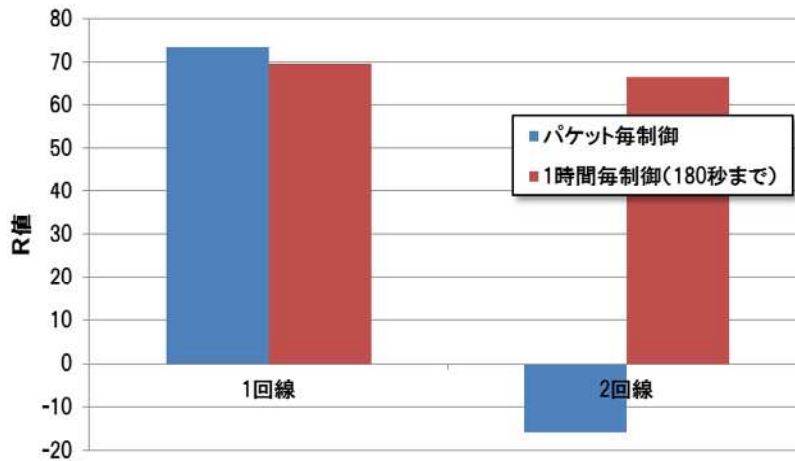


図 5-14. 2 ホップの測定結果(3 分間)

表 5-9 の結果より、1 時間毎制御においては、1 回線時と 2 回線時を比較してもパケットロスは 2%から 3%と 1%しか増加しておらず、遅延に関しても 14ms から 23ms と 9ms しか増加していない。これは 1 時間毎制御方式では、瞬間に 10%デューティを超えていても、制限内であればパケットの連続送信が可能な方式であるためである。

図 5-14 の横軸は同時回線数を、縦軸は R 値を示している。1 時間毎制御方式においては、3 分間の測定時間から R 値を算出することで、2 ホップ 2 回線時においても 66 の R 値を維持できている。この結果、通話時間を 3 分間とすることで、2 回線時においてもクラス C の音声通話が可能であると言える。一方、パケット毎制御方式については、パケットの再送時には必ず 9 倍の送信休止時間が発生するため、パケット再送毎に遅延が増大する。その結果、遅延による無線局での待ち合わせ時間が増大し、無線局のバッファが溢れることによるパケットロスが発生しているものと推測される。

#### 5.4.3. ラボ内試験との比較

デューティ制御方式の比較評価に関して、4.4 のラボ内での試験結果と、フィールドでの試験結果を比較する。1 時間毎制御方式において、2 ホップ環境における同時回線数の変化に対するパケットロスと遅延及び遅延揺らぎとデューティについて、10 分間測定した比較結果を表 5-10 に示す。また R 値についてグラフ化したものを図 5-15 に示す。

表 5-10. 2 ホップの 1 時間毎制御(10 分間)

回線数	デューティ制御	ロス (%)	遅延(ms)	揺らぎ(ms)	Duty (%)	R 値
1	ラボ	0.3	13	0.6	7.5	76.8
	フィールド	3.2	14	4	8	66.3
2	ラボ	29	164	239	14.8	9.8
	フィールド	20	96	178	16.7	26.3

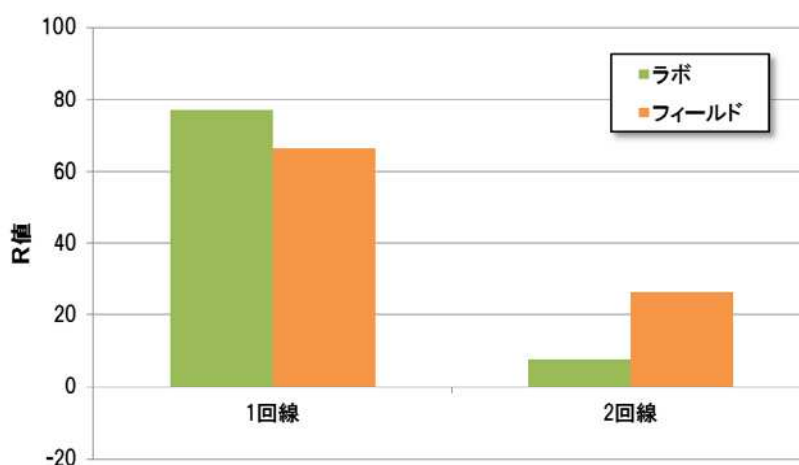


図 5-15. 2 ホップの 1 時間毎制御(10 分間)

表 5-10 の結果より、2 回線時の 10 分間の測定結果は、ラボ内試験およびフィールド試験ともにパケットロス及び遅延と揺らぎが悪化していることが分かる。

図 5-15 の横軸は同時接続回線数を、縦軸は R 値を示している。2 回線時においては、ラボ内試験およびフィールド試験とも R 値が低下していることが分かる。

次に 2 ホップ環境で同時回線数の変化に対するパケットロスと遅延及び遅延揺らぎとデューティについて、3 分間測定した比較結果を表 5-11 に示す。また R 値についてグラフ化したものを図 5-16 に示す。

表 5-11. 2 ホップの 1 時間毎制御(3 分間)

回線数	デューティ制御	ロス (%)	遅延(ms)	揺らぎ(ms)	Duty (%)	R 値
1	ラボ	0.3	13	0	7.5	77.1
	フィールド	2	14	3	7.4	69.5
2	ラボ	2	13	0.8	14.8	69.3
	フィールド	3	23	9	16.7	66.4

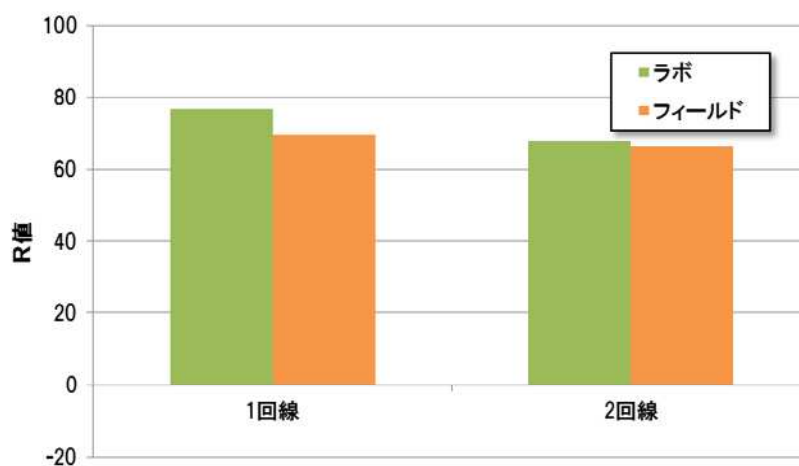


図 5-16. 2 ホップの 1 時間毎制御(3 分間)

表 5-11 の結果より、2 回線時において、測定時間を 3 分間とすることでラボ内試験およびフィールド試験ともにパケットロスや遅延および揺らぎがそれほど悪化していないことが分かる。

図 5-16 では、ラボ内試験と比べてフィールド試験の方が R 値の低下が見られるが、この要因としては 5.3.3 の結果と同様に、フェージングによるリンク品質の変動や、隠れ端末によるパケットロスの影響と推測される。

## 5.5. フィールド検証のまとめ

### 5.5.1. 結果

#### (1) 電波伝搬フィールド試験

見通し外環境で受信電界強度が-80dBm 以下の場合にパケット受信率が悪くなっている。

#### (2) マルチホップ試験

1 回線の 3 ホップ(約 2.3km)において、R 値 66 の通話品質が可能であった。また、1 回線の 4 ホップにおいては、ラボ内環境とは異なり、R 値 48 程度となったが、通話の内容は聞き取れるレベルであった。

#### (3) デューティ制御方式の試験

ラボ内検証と同様に、1 時間毎制御の前半 180 秒から R 値を算出した場合、2 回線の 2 ホップにおいても R 値 66 となり、通話可能な品質であった。

### 5.5.2. 考察

音声データ伝送をマルチホップ環境で安定して行うためには、受信電界強度が-80dBm 以上の環境が望ましい。このためには、回線設計において、アンテナの設置箇所の選定や、マルチパスを考慮した伝搬調査を十分に行うなどの対応が必要である。

1 回線の 3 ホップでは、IP 電話品質レベルの通話が可能である。1 回線の 4 ホップでは R 値の基準からは外れるが、会話の内容は聞き取れるレベルであった。そのため、R 値を基準としつつも、実ユーザを対象とした音声通話テストによる主観評価をすることが望ましい。

1 回線であれば、デューティ 10%以内での連続通話が可能であるが、2 回線では困難となる。このため、複数回線での連続通話を可能とするためには、送信時間制限に対し、通話 4 分後の 8 分休止、もしくはデューティを 20%に緩和することが望ましい。



## **6. 周波数共用条件の検討**

6.1. 無線システムの干渉要件

6.2. 音声データ伝送の無線設備の諸元

6.3. 隣接無線局との干渉検討

6.4. 同一周波数帯使用無線局との干渉

6.5. 自局システム間干渉

## **7. 音声データ伝送の技術的条件案**

7.1. 適用範囲

7.1.1. 送信出力

7.1.2. 周波数

7.1.3. 送信時間制限

7.1.4. 電波防護指針

7.2. まとめ

## 付 録

付録1 構成員名簿

:座長 / :副座長

敬称略

団体名	役職	氏名
公立大学法人岩手県立大学	教授	むらた よしとし 村田 嘉利
国立大学法人国立岩手大学	准教授	ほんま なおき 本間 尚樹
岩手県総務部総合防災室	防災危機管理 担当課長	おおはた みつひろ 大畑 光宏
岩手県政策地域部情報政策課	総括課長	ふるだて よしゆき 古舘 慶之
盛岡市総務部総務課情報企画室	室長	さとう あきひこ 佐藤 明彦
遠野市経営企画部	管理情報担当課長	さわむら かずゆき 澤村 一行
釜石市防災危機管理課	課長	ささき とおる 佐々木 亨
滝沢市経済産業部企業振興課	総括主査	きのした しょうぞう 木下 昇三
大槌町総務部	総務部長	ひらの こうぞう 平野 公三
山田町総務課情報チーム	課長補佐	ふなごし かいへい 船越 海平
一般社団法人全国陸上無線協会東北支部	支部長	きくち やすひろ 菊池 安博
株式会社佐々木電機本店		きくち たかひろ 菊池 高広
有限会社岩手総合電子	代表取締役	どい たけふみ 土井 武文
有限会社トータル通信	代表取締役	きくち としみつ 菊池 俊光
創造技研株式会社	代表取締役	みかた まさひと 三方 雅仁

## 付録2 調査検討会の開催状況

### 1. 調査検討会

#### 第1回調査検討会

日 時:平成 26 年 7 月 3 日(木)14 時 00 分～16 時 00 分

場 所:岩手県立大学アイーナキャンパス 学習室 1

(アイーナいわて県民情報交流センター7 階)

議題:

1. 開催要綱
2. 調査検討会構成員
3. 920MHz 帯を利用した無線システム及び制度整備状況
4. 920MHz 帯を利用したセンサーネットワークシステム
5. 音声データ伝送の利活用状況
6. 調査検討会の進め方

#### 第2回調査検討会

日 時:平成 26 年 10 月 2 日(木)14 時 00 分～16 時 00 分

場 所:岩手県立大学アイーナキャンパス 学習室 1

(アイーナいわて県民情報交流センター7 階)

議題:

1. 第 1 回調査検討会議事録(案)
2. 920MHz 帯無線センサーネットワークシステムの利用に関するアンケート結果まとめ
3. 音声データ伝送にかかる無線センサーシステムの諸元について
4. 音声データ伝送の理論値とラボ内検証について
5. 実証試験の方法とスケジュール

#### 第3回調査検討会

日 時:平成 26 年 12 月 19 日(金)13 時 00 分～16 時 00 分

場 所:大槌町役場 3 階会議室

議題:

1. 第 2 回調査検討会議事録案
2. 920MHz 帯を利用した無線センサーシステムの比較
3. ラボ内検証の結果について
4. フィールド試験の結果について
5. 干渉検討の手法について
6. 報告書のまとめ方について

