

信州大学審査学位論文

安全・安心な社会のための  
無線情報基盤構築に関する研究

2012年3月

野瀬裕昭

# 目次

第1章 序論	1
1-1 本研究の背景	1
1-1-1 情報通信基盤の整備	1
1-1-2 無線 Ad-Hoc ネットワーク	2
1-1-3 センサネットワーク	2
1-1-4 安全・安心な社会の実現に向けて	3
1-2 本研究の目的	6
1-3 本論文の構成と要旨	6
参考文献	8
第2章 無線 Ad-Hoc ネットワークによる地域見守りシステムの構築	9
2-1 緒言	9
2-2 地域見守りシステムの現状	9
2-2-1 端末	10
2-2-2 固定局	11
2-3 長野県塩尻市における地域見守りシステム	12
2-3-1 システムの概要	12
(1) システムの動作概略	13
(2) 提供するサービス	13
2-3-2 システム構成要素の詳細	16
(1) 子機	16
(2) 中継機	18
(3) 無線規格	19
(4) サーバ	21
2-3-3 通信プロトコル	21
2-4 結言	23
参考文献	25
第3章 地域見守りシステムにおける無線プロトコルの改良	26
3-1 緒言	26
3-2 プロトコルの評価基準	27
3-3 子機の集中による問題	28
3-3-1 問題のモデル化	28
3-3-2 固定長待ち時間の導入	28
3-4 中継機の増設による問題	32
3-4-1 問題のモデル化	32
3-4-2 重複抑制プロトコル	33
3-5 実機を用いた評価	35
3-6 送信パケット種別による分析	38
3-6-1 提案1による改善の効果	38
3-6-2 提案2による改善の効果	39
3-7 中継機及び回線容量の検討	40
3-8 結言	40
参考文献	41

第4章	パケット損失率と利用者アンケートによる地域見守りシステムの評価	42
4-1	緒言	42
4-2	システムの現状	43
4-2-1	子機台数	43
4-2-2	中継機網	43
4-3	測位精度実験	44
4-4	中継機におけるパケット損失率の評価	46
4-5	子機パケットの損失率	47
4-6	損失率の低減における改良プロトコルの効果	52
4-7	アンケート調査	52
4-7-1	位置情報の正確性	52
4-7-2	満足度	53
4-7-3	児童の安全に対する評価	54
4-7-4	アンケート全体の評価	54
4-8	結言	55
第5章	センサネットワーク端末の小型化と省電力に関する提案と評価	57
5-1	緒言	57
5-2	提案プロトコル	60
5-2-1	受信回路の省略	60
5-2-2	受信回路を省略することの問題点	60
5-2-3	提案プロトコル	61
	(1) ランダム遅延時間の設定	62
	(2) 過去データの重複送信	62
5-3	評価	63
5-3-1	仕様	63
5-3-2	シミュレーションによるデータ損失率の評価	63
	(1) ランダム遅延時間 Y の導入	66
	(2) 過去データの重複送信 Z の導入	66
	(3) 端末台数による評価	68
	(4) ACK とキャリアセンスが挿入されたプロトコルとの比較	68
5-3-3	実機を用いた評価	70
5-3-4	回線容量の検討	75
5-3-5	消費電力	76
5-4	結言	78
	参考文献	80
第6章	結論	81
	本論文に関する発表論文等	84
	謝辞	86

# 第 1 章

## 序 論

# 第1章

## 序 論

### 1-1 本研究の背景

#### 1-1-1 情報通信基盤の整備

我が国における情報基盤の整備は、2001年から実施された e-Japan 戦略を契機に目覚ましい進展を遂げた。すべての国民に安価で高速なネットワーク環境を提供することを掲げ、IT 先進国へのキャッチアップを目標に様々な施策が展開された。この結果、超高速通信網によるバックボーンの整備及びブロードバンド環境の整備が進み、日本におけるネットワーク環境は世界的に見ても先端かつ充実したものとなり、多くの人々がネットワーク接続による恩恵を受けることが可能となった。

2006年以降には、e-Japan 戦略の後を受けける形で u-Japan 戦略が策定され、キャッチアップ的な発想から転換し、有線中心で行われてきた単なるブロードバンド環境

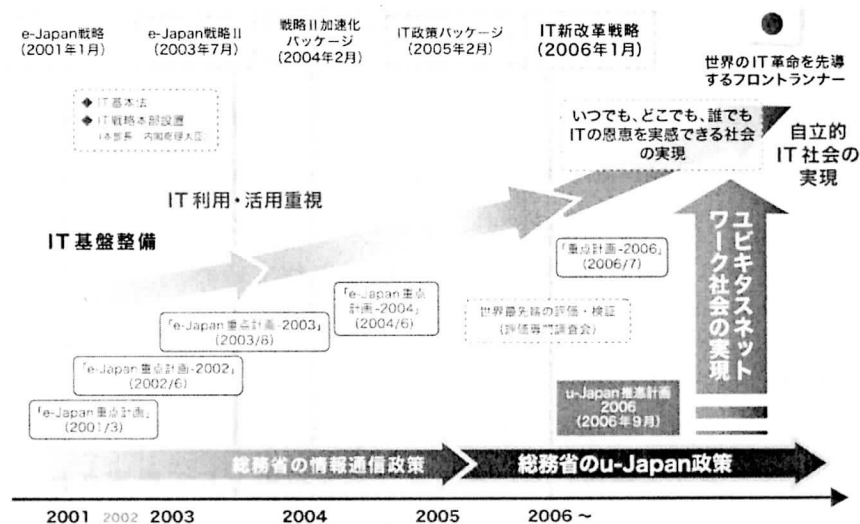


図 1.1. 日本の ICT 戦略(e-Japan → u-Japan) (出典[1])

の拡張から、有線・無線の区別のないシームレスなユビキタス環境への移行が図られている。また、インフラの整備と併せて、積極的な利活用を推進することにより「社会に役立つ ICT」の実現が目標とされている。つまり、U-Japan では、[Ubiquitous] を中心に [Universal] , [User-oriented] , [Unique] という 3 つの理念を実現することにより、ICT の活発な利活用を促し、新しい社会システムや価値観の構築を実現している。特に Ubiquitous における「あらゆる人や物が結びつく」という基盤性に着目し、崩壊しつつある地域のコミュニティを活性化することにより、世代・地域を超えた新たなコミュニケーションを構築し、活発にすることが強く期待されている。

### 1-1-2 無線 Ad-Hoc ネットワーク

u-Japan 戦略では、有線・無線のシームレスなアクセス環境を整備するため、固定系と移動系のネットワークの融合に関する技術課題の解決が重要視されている。この中でも、新たな移動系のネットワークにおける基盤技術として注目されているのが無線 Ad-Hoc ネットワークである。無線 Ad-Hoc ネットワークとは、アクセスポイントを必要とする一般的な無線 LAN とは異なり、無線端末のみで構成することが可能な自律分散型の無線ネットワークである。接続技術として IEEE 802.11.X, Bluetooth など様々な技術を利用し、多数の端末をアクセスポイントの介在なしにマルチホップ技術を用いて相互に接続する。つまり、大規模かつ高価な基地局やアクセスポイントを必要としないため、ある限られた域内における安価なネットワーク構築手法である。特にアドホックマルチホップネットワークに関しては、第 3 期科学技術基本計画に向けた総務省の UNS(Universal Communication, New Generation Network, Security and Safety)戦略プログラムにおいても、「ユビキタスモビリティ」というテーマの中で取り上げられており、重点的な技術開発目標とされている。

### 1-1-3 センサネットワーク

センサネットワークは、意識されることなく偏在し環境などの物理状況を採取することを目的に、ユビキタス構想における重要な要素技術として提案された[2]。ネットワークをインビジブルなものとし、あらゆるものをインテリジェントに接続することで、ユビキタス環境における「どこでも」「何でも」というコンセプトを実現することが期待されている。現在では、自然環境計測、工業計測、医療及び交通状況監視など

の分野を中心に応用が進められており、実際に商品化されたものも登場している。システムの構成としては、ノードと呼ばれる無線端末が通常1つ以上存在し、内蔵する各種センサによって計測されたデータが無線により送信され、それらを収集することによりシステム全体の計測を行う。

UNS 戦略プログラム II における「セキュアネットワーク」においても、「センサ等により、災害時に被災者救出・支援や状況把握に必要な情報を収集・配信可能とする技術を確立」というテーマでセンサネットワークが取り上げられており、重点的な技術開発目標とされている。あらゆる環境に広く分布させることを目的とする場合が多く、環境負荷の観点からセンサ端末の小型化・省電力化を中心に様々な取り組みが行われている。

#### 1-1-4 安全・安心な社会の実現に向けて

##### (1) 災害への対応

近年、地震、津波、噴火及び気象災害をはじめとする自然災害の発生件数が、世界的に見て増加の傾向にある(図 1.2)。特に、東日本大震災や新潟県中越地震などのように広域的に被害が広がる大規模災害が頻発している[3]。

このような災害が発生すると、設備の倒壊・水没・流出が発生することにより、通信基盤に大きなダメージを受け通信サービスが停止してしまう。さらに、電力の供給も同時に停止するため、蓄電池の枯渇等により通信サービスの停止が長期化してしまうことも指摘されている。特に被害の大きかった東日本大震災では、その後の大きな余震の影響もあり、固定通信網、携帯電話及び PHS などの主要な通信設備が、一部を除く全域で復旧するまでにじつに1ヶ月半以上を要したことが報告されている[4]。

一方、災害の発生時には、図 1.3 に示すとおり大量の情報が発生する[5]。発生直後の応急対応期における情報量の初期増大は、一般的な安否確認によるものが主であるが、行政による被災状況確認や人命救助など緊急を要する情報が増大するのもこの時期である。また、時間の経過と共に避難者の居所確認などの情報量が増え、その後復興期に向けて情報量の増大は収集に向かうことになる。

つまり、より緊急を要する情報が大量に発生する災害直後に、肝心の情報通信に係るインフラが壊滅状態となり、災害対応における大きな足かせとなってしまう。さらに、避難状況の確認などで一般の被災者やその関係者が最も情報を必要とする時期に、

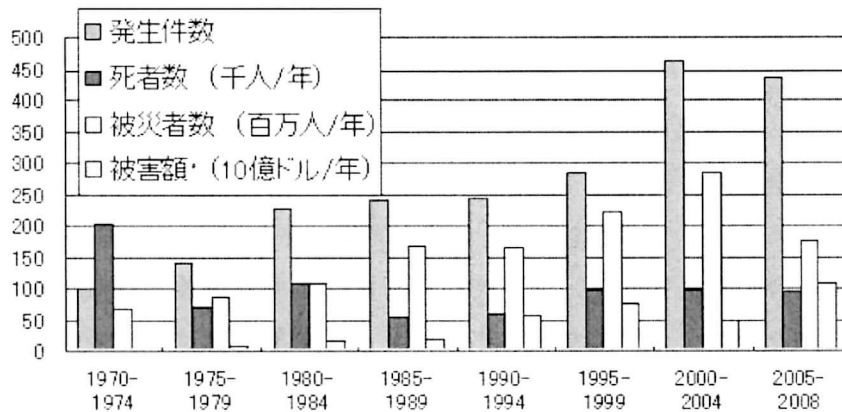


図 1.2. 自然災害の発生件数，死者数，被災者数及び被害額の推移 (出典[3])

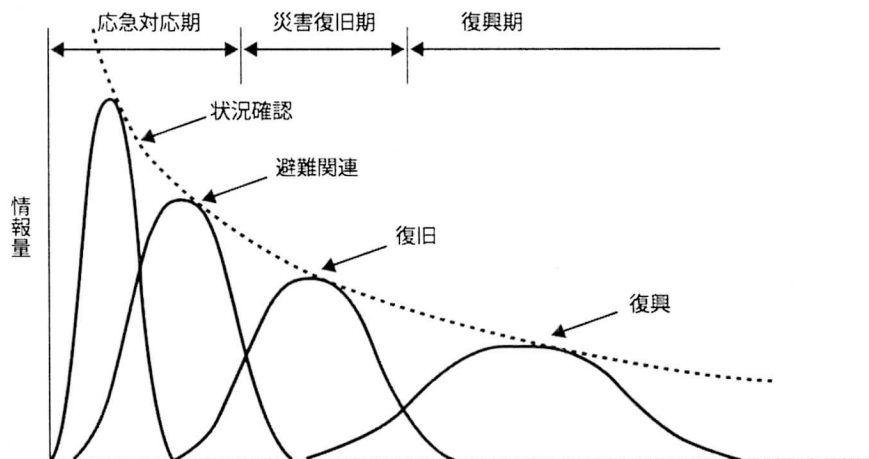


図 1.3. 災害発生後の日数と流通する情報の種類 (出典[5])

やはり満足な情報通信サービスを提供できない事態を招いている。このため、UNS 戦略プログラム II においても「センサ等により、災害時に被災者救出・支援や状況把握に必要な情報を収集・配信可能とする技術を確立」というテーマを掲げ、災害に強い情報通信基盤の整備を喫緊の課題としている

## (2) 地域における子供の見守り

近年、子どもを被害者とする凶悪な事件が多発している。刑法犯に係る子どもの犯罪被害件数は、2009年度 27万 5,322件となっており、刑法犯被害件数全体に占める



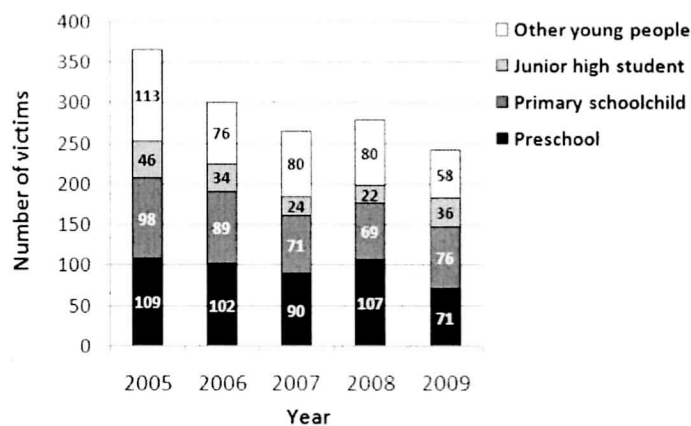


図 1.4. 就学別子ども犯罪被害（殺人・略取・誘拐）件数

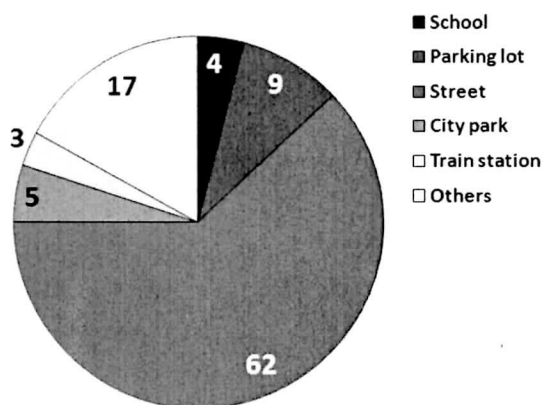


図 1.5. 住宅外での場所別略取・誘拐犯罪被害発生件数（2009年）

割合は、実に 20.2%となっている[6]。殺人・略取・誘拐などの凶悪事件における就学別子ども犯罪被害件数(図 1.4)を見ると、全体的な件数は様々な取り組みにより減少傾向にあるものの、全体に占める小学生の割合が高いことがわかる。また、略取・誘拐などの連れ去りに関する事例について、実際に犯罪の被害に遭う場所に関しては(図 1.5)、道路上が圧倒的に多く全体の 62%を占めている。これらのことから、小学生の登下校時を狙った犯罪が多いことが推測できる。とくに郊外では、人通りの少ない住宅地、田畑及び山林なども多く、このような場所で子どもがひとりになったところを狙われ、重大な犯罪に巻き込まれるケースが発生している。このため、登下校時など

子どもが一人になる可能性のある時間帯において、子どもの位置を特定し、犯罪者から子供を守る地域見守りシステムの必要性が急速に増している。

## 1-2 本研究の目的

災害時にも有効に機能する高い耐障害性を有する情報通信基盤の整備は、東日本大震災など大規模災害からの経験から喫緊の課題となっている。これには、基地局やアクセスポイントなどの固定設備が被災することにより、広範囲の通信が途絶してしまう現在の通信基盤に対して、ネットワークの構成要素の一部が被災しても自律的にネットワークを再構築可能なシステムが有効であると考えられる。また、このような災害時の活用を前提としたシステムには、災害発生時における緊急を要する情報通信を迅速に処理するため、直ちに利用を開始できる環境が必要となる。いざ災害発生という事態において、機材の不調、操作に不慣れなど初期対応のまずさにより有効に活用できないという事態はあってはならない。このため、日常的にこのシステムを利用するアプリケーションを提供し、定常的な運用管理が行われる事が重要となる[7]。

本研究では、以上の課題に対して、電源、ネットワーク等のあらゆる有線ケーブルから独立して動作する無線 Ad-Hoc ネットワークを提案し、さらに日常的にこれを利用するアプリケーションとして、児童の安全を保証する地域見守りシステムを提案する。特に、地域見守りシステムについて、定期的に児童の位置を推定可能であることを、実運用に供されているシステムを元に検証する。さらに、新たなアプリケーションの可能性として、センサネットワークとの融合を見据え、新たに小型・省電力なセンサ端末を提案し、併せてプロトコルの提案も行いその性能について評価する。

以上、本研究は、無線 Ad-Hoc ネットワークを用いた情報基盤の整備と、平常時に利用されるアプリケーションの開発を併せて行い、災害に強い新しい情報通信システムのあり方について提案を行うものである。

## 1-3 本論文の構成と要旨

本論文は、高耐障害性なネットワークシステムとしての無線 Ad-Hoc ネットワークの構築と、そのシステム上で利用される地域見守りシステム及び新たなセンサネットワークの提案を対象としている。第 2 章、第 3 章及び第 4 章が無線 Ad-Hoc ネットワ

ークの構築と地域見守りシステムを,第5章がセンサネットワークを対象としている.

第1章は序論で,本研究の背景となる我が国における情報通信基盤整備の状況,近年の災害時における情報通信基盤の現状や児童を取り巻く犯罪の状況について紹介し,本研究の位置づけを明確にする.さらに,これらの背景のもとでの本研究の目的を明らかにする.

第2章では,現在実稼働中である,長野県塩尻市に構築した無線 Ad-Hoc ネットワークによる地域見守りシステムについて,児童が持つ子機,市内に配置された中継機,さらにそれらの無線規格及びパケット構成などの詳細を述べる.特に,中継機を太陽電池パネルと2次電池により独立した電源系としたこと,及び通信回線を無線 Ad-Hoc ネットワークとしたことにより災害時にも有効な情報通信基盤となりうる特徴をこの章で紹介する.

第3章では,地域見守りシステムの特徴的な2つの問題を明らかにした上で,これらを解決するためにそれぞれ新たな2つのプロトコルを提案する.さらに,これらのプロトコルについて,シミュレーションと実機を用いた評価結果の詳細を示す.

第4章では,地域見守りシステムを評価するため,児童が子機を実際に利用している状況下でのパケット損失について評価する.また,本システムを利用している児童の保護者に対してアンケート調査を実施し,その結果をもとに児童を見守るシステムとしての本システムの有効性について検討する.

第5章では,受信回路を省略したセンサ端末と,その端末を利用したセンサネットワークのための新たなプロトコルを提案し,このネットワークにおけるデータ損失率についてシミュレーションと実機による評価の結果を示す.さらに,センサ端末の電池寿命について,従来端末との比較により評価を行った結果を示す.

最後の第6章は結論で,本研究で得られた主要な成果について総括する.本論文の成果は,無線 Ad-Hoc ネットワークの構築とそのアプリケーション開発という課題に対して,単なる実験室レベルでの検討にとどまらず,長野県塩尻市において実運用に供されているシステムとして展開されているという大きな特徴を持っている.

## 参 考 文 献

- [1] “u-Japan 推進計画 2006”,総務省,September 2006
- [2] Kahn, J. M., R. H. Katz and K. S. J. Pister,“Mobile Networking for Smart Dust”,  
ACM/IEEEIntl. Conf. on Mobile Computing and Networking(MobiCom 99),  
Seattle, WA, Aug.1999
- [3] “防災情報のページ”, <http://www.bousai.go.jp/index.html>,内閣府
- [4] “平成 2 3 年版 情報通信白書”,総務省,August 2011
- [5] 山田肇 編著,泉田裕彦/市川彰/小林隆/榊原直樹/関根千佳/藤方景子/遊間和子  
著,C&C 振興財団 監修:みんなの命を救う～災害と情報アクセシビリティ,NTT 出  
版, 2006-10-27
- [6] “平成 21 年の犯罪情勢”, 警察庁, June 2010
- [7] 不破泰 : 高耐障害性アドホックネットワークシステム ; 電子情報通信学会誌,  
Vol.91 No10, pp.862-863,2008

## 第2章

### 無線 Ad-Hoc ネットワークによる 地域見守りシステムの構築

## 第 2 章

# 無線 Ad-Hoc ネットワークによる

## 地域見守りシステムの構築

### 2-1 緒言

本章は、長野県塩尻市に構築した無線 Ad-Hoc ネットワークを用いた地域見守りシステムの構成を対象とする。災害時における停電、有線系の通信回線分断などの状況下において、災害対応に必要となる情報の流通を保証するための通信基盤が強く必要とされている。さらに、災害等の緊急時における利用を想定したシステムにありがちな、実際の緊急時に起動障害や利用手順の不徹底でその能力を発揮できないといった事態を防ぐため、平時にそれらシステムを常に利用するアプリケーションも併せて必要とされている。

本研究では、平時のアプリケーションとして、児童の位置特定を目的とした地域見守りシステムを開発し利用している。そこで、本章では、自立分散型の中継機網を中心とする長野県塩尻市に構築された無線 Ad-Hoc ネットワークについて、地域見守りシステムに必要な構成要素を中心に詳述する。

### 2-2 地域見守りシステムの現状

総務省の報告[1]によると、地域見守りシステムの構築に向けた取り組みは現在全国で行われており、前述報告書には我々のシステムも含めて 16 件の事例が報告されている。そこで、これら事例を基に、現存する地域見守りシステムの問題点を分析する。この際、一般的な地域見守りシステムが備える要素として、児童が身に付けて持ち運ぶ端末と、それら端末からの電波を受信し児童の位置を特定するための情報を得る固定局の 2 つがあるので、これら 2 つの要素をもとにそれぞれ特徴を整理する。

## 2-2-1 端末

見守りシステムにおいて、児童が身につけて持ち運ぶ装置が端末である。この端末には無線装置が使用され、その形態はパッシブタグ、アクティブタグ及び携帯電話など様々である。以下に、それぞれ代表的な端末について特徴をまとめる。

### (1) パッシブタグ

読み取り装置からの電波による電磁誘導を電力源とするため、電池交換が必要ないことが最大の長所である。また、端末そのものを非常に小さくすることが可能である。しかし、通信可能距離は最大でも数m程度であるため、校門や昇降口などすべての児童が必ず通過する狭い領域内に読み取り装置を設置し、その地点を通過したかどうかをチェックするシステムでのみ利用可能である。

### (2) アクティブタグ

電池を内蔵し、その電力により自律的に電波を発信することが可能である。このため、定期的な電池交換が必要となる。しかし、パッシブタグに比べて通信可能距離は飛躍的に向上し、見通しで 100m 以上を実現するものもある。この到達範囲の長さから、市街地や通学路などに読み取り装置を複数設置することにより、2次元的な児童の位置特定が可能となる。

### (3) 携帯電話

一般的な携帯電話を端末として利用するシステムも提案されている。基地局等のインフラの整備が進んでおり利用可能な範囲が広いこと、さらに GPS 機能など高度な機能を利用することが可能であるなどの利点を持つ。しかし、端末そのものが高価であること、GPS は消費電力が大きく充電頻度が多いこと、さらには児童に携帯電話を持たせる事の是非について社会的に結論が出ていないなど制約も多い。

以上が代表的な端末の形態に関する特徴であるが、端末によらない問題も存在する。ひとつの読み取り装置に端末が集中すると、同時にすべての端末を認識しきれないケースである。この問題に関しては、端末に Ad-Hoc 機能を持たせ、グループ化することにより認識率を向上するなどの提案が行われている[2][3]。

## 2-2-2 固定局

端末からの電波を受信し，端末の位置あるいは通過に関する情報を発信または転送する装置が固定局である．このように端末からの電波を受信する読み取り装置に準じた機能を持つものが大勢を占めるが，固定局が位置情報を発信しこれを受信した端末が携帯電話回線により位置情報を発信するシステムも実現されている[4]．ここでは，一般的な固定局として，端末からの電波を受信して動作する固定局について，設置される場所と情報の中継方式に注目しその特徴を整理する．

### (1) 設置場所

固定局の設置場所には，端末の電波の到達距離により違いが現れる．まず，その設置場所の違いによる特徴を述べる．

#### a. 校門等限定されたポイントに設置される場合

端末が，パッシブタグなど通信可能距離の短いものである場合，校門や昇降口など児童が必ず通過するポイントに設置する場合が多い．この場合，固定局からごく近い場所を児童が通過するため，監視カメラと連動させるなど，児童の通過を正確に確認するためのサービスと連携させることが可能である．しかし，校門などのごく限られた場所の「通過」という事実しか追跡することができず，何らかの原因により児童の通過を読み取れなかった場合，逆に保護者を不安にさせてしまうという可能性も考えられる．

#### b. 市街地等広い範囲に散在する場合

端末が，アクティブタグや携帯電話など通信可能距離が比較的長いものである場合，固定局を市街地などの電柱，街灯及び自動販売機などに複数設置し，その固定局の位置をもとに児童の位置を特定するシステムがある．このような事例の場合，児童の位置特定の精度は高く，中には数十 cm の精度で特定することが可能なシステム[4]もある．ただし，このような高精度な固定局の設置には多額の設備投資が必要となり，高額なシステムとなってしまう．また，位置の検出精度を上げるためには固定局の密度を上げれば良いのだが，固定局の密度が上がると，複数の固定局が同時に同じ端末からの通信を中継しようとするため回線の混雑が発生してしまうという問題もある[5]．



## (2) 中継方式

固定局は、端末からの電波を受けてその位置や通過に関する情報を、上位の情報収集サーバ等へ中継する必要がある。このため、何らかの形でネットワークに接続されている必要がある。この接続形態の違いによる特徴を述べる。

### a. 公共のインフラ利用

固定局が校門等の限定された場所に設置される場合、学校等にはすでに公共の地域情報網が整備されていることが多く、固定局を接続する場合は、これらのネットワークに接続するだけで良い。このため、台数も限られるので固定局のために特別な回線を準備する必要がなく設備投資は少なくてすむ。また公共の回線であれば回線費用も抑えることが可能である。

### b. 事業者のインフラ利用

固定局が広い地域に複数設置される場合、それらを結ぶための特別な回線が必要となる。これには、CATV 網への接続、PHS や携帯電話の回線利用などがその利便性から用いられることが多い。しかし、回線使用料が非常に高額となり、システムの運用を圧迫することになってしまう。

a. b.ともに既存のインフラを利用する形態であるため、いずれにしろインフラの整備がなされていないと利用することができない。また、災害時等に通信回線がダメージを受けると、通信回線の遮断によりシステムが停止してしまう可能性が非常に高い。

## 2-3 長野県塩尻市における地域見守りシステム

本章では、長野県塩尻市に構築された地域見守りシステム[6][7][8]について述べる。

### 2-3-1 システムの概要

図 2.1 に、本システムの概略図を示す。児童が持つ端末を、以下子機と呼ぶ。また、各所に設置された固定局を、以下中継機と呼ぶ。

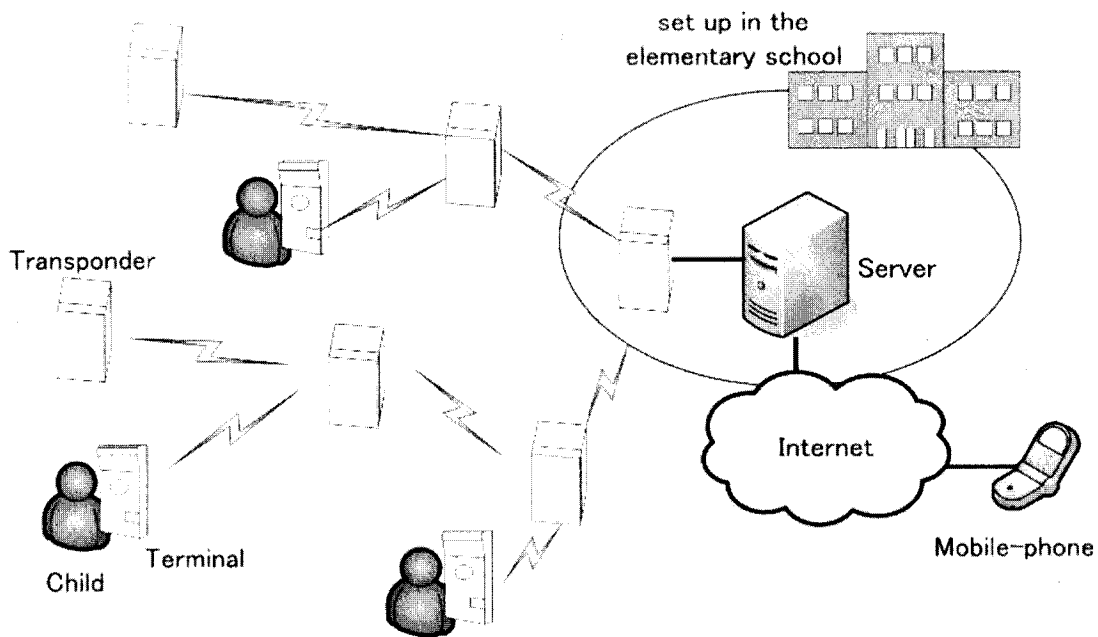


図 2.1. 地域見守りシステム

### (1) システムの動作概略

子機は、定期的に自身の端末 ID を記したパケットを送信し（このパケットを定期通報と呼ぶ）、中継機がこれを受信する。

中継機は、塩尻市街に面的な広がりを持たせながら複数台設置している。中継機間は、Ad-Hoc ネットワークによるマルチホップの無線ネットワークを形成しており、子機からのパケットを受信した中継機は、受信データにそのパケット受信時の電界強度情報を付加したパケットを、このネットワークによりサーバへ中継する。

サーバでは、中継されてきたパケットの受信電界強度情報と、それを送信した中継機の位置情報により児童の位置を推定する。これにより、校門等の限られたポイントにおける単なる通過情報ではなく、児童の位置を2次的に、さらにはある程度リアルタイムに追跡することが可能なシステムとなっている。

### (2) 提供するサービス

本システムが、システムの利用者に対して提供する主要なサービスは以下のとおりである。

- a. システム利用児童の保護者は、携帯電話等で閲覧可能な Web ページ上で、地図上に表示される児童の位置を確認できる(図 2.2).
- b. 各児童の通学エリアを、予め保護者がシステムに登録することが可能である. 本システムにおける通学エリアの登録は、児童の位置が許容されるエリアに登録するのではなく、逆に児童が侵入してはならない地域をカバーする中継機を指定することにより登録する. 侵入してはならない地域としては、通学路から明らかに外れた地域、川など危険な地域及びゲームセンターなどの不適切な地域が考えられる. これは、Web ページにアクセスすることにより、保護者が自由に登録することが可能である. サーバで推定された児童の位置が、上記により登録された中継機の位置であった場合、保護者の携帯電話等に経路外へでたことを知らせるメールと地図(図 2.3) が送られる.

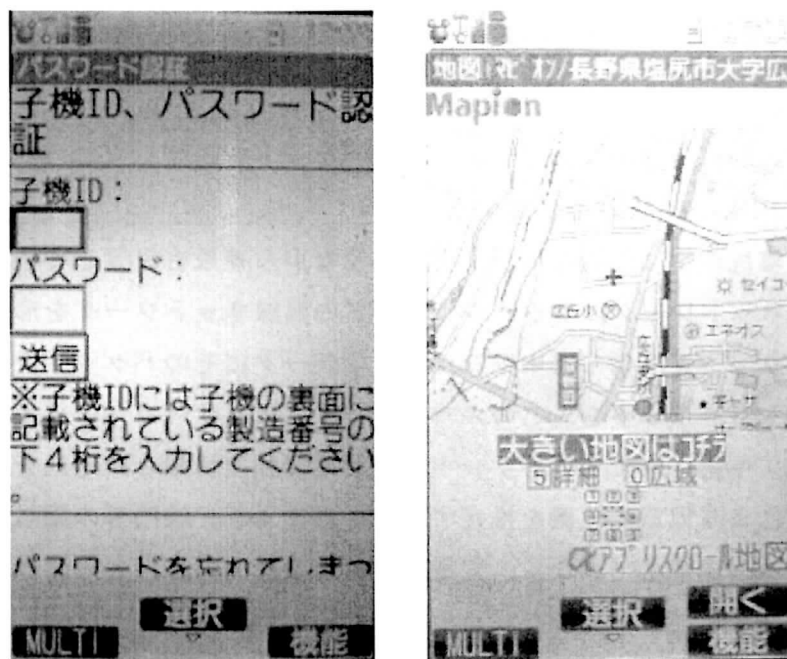


図 2.2. 携帯電話でのログイン画面と児童の位置確認画面

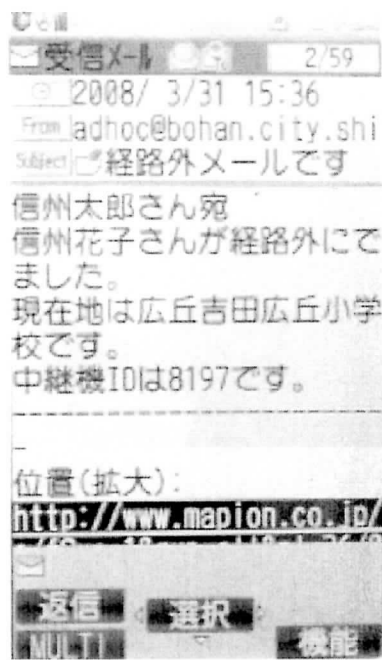


図 2.3. 携帯電話での経路外を知らせる情報

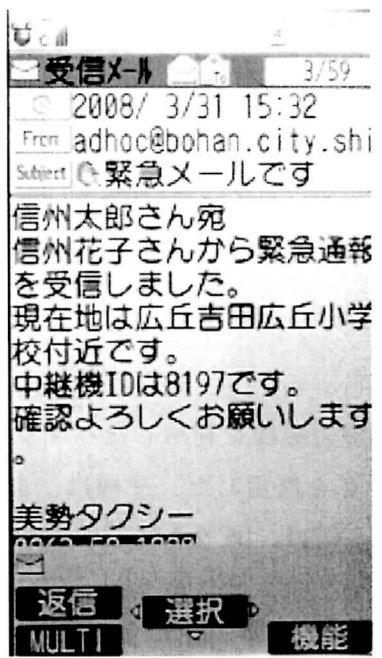


図 2.4. 携帯電話での緊急を知らせる情報

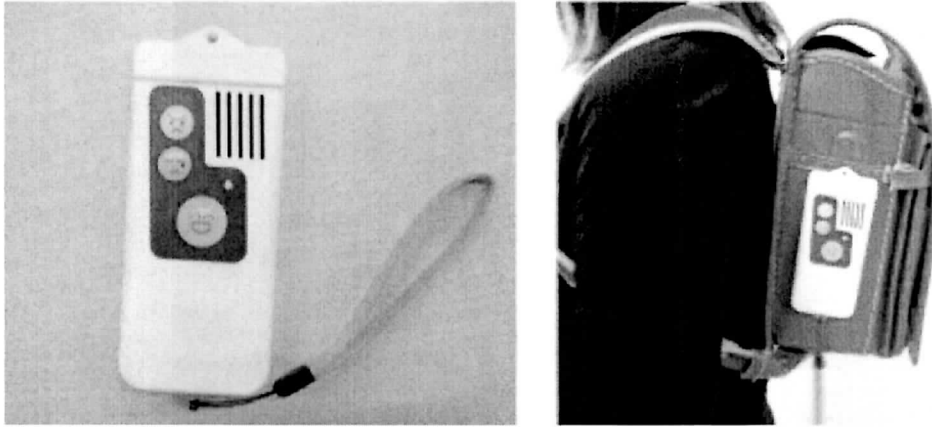


図 2.5. 子 機

c. 子機には、一般的な防犯ブザーと同様に緊急ストラップがあり、児童がこれを引き抜くと、保護者の携帯電話等にその旨を通報するメールと地図を送る(図 2.4).

塩尻市内の小学校へ通学する児童の保護者は、児童が携帯する子機を購入(2万円程度)すると、前述したサービスに関してはすべて無料で享受することが可能である。これは、「行政区域内の情報通信基盤に係るシステムの運用は、税金で負担すべきものである」という事業の運営主体である塩尻市の考えに基づくものである。

### 2-3-2 システム構成要素の詳細

本システムは、前述したとおり子機、中継機及びサーバから構成される。以下に、それぞれの詳細について述べる。

#### (1) 子機

本システムにおける子機には、自ら特定小電力無線を利用したパケットを発信することが可能な、電池を内蔵したアクティブタグを採用した。子機は、自らの端末 ID を載せたパケットを定期的に発信する。この子機は、図 2.5 に示すとおり児童がランドセルに付けて使用する。基本的な仕様については、寸法が W57mm×H128.5mm×D17.5mm、重量が 80g 及び通信可能距離が見通しで約 200m となっている。

アクティブタグを採用したことにより、通信可能距離を見通しで 200m 程度まで確保できたが、2-2-1 (2) で述べたように電池を内蔵しているため定期的な電池交換が必

要となる。特に GPS を利用する場合、消費電力が大きくなり交換の頻度は高くなるため、本システムの子機では GPS を搭載せず、子機からのパケットを受信する中継機の情報から児童の位置を推定することとした。

電池交換の頻度があまりに頻繁だと、電池の交換忘れ、さらには交換が面倒で利用されなくなるなどの事例が多発することが想定される。そこで、子機に振動センサを搭載し、児童の移動中と静止状態を判別する機能を付加し、移動時のパケット送信の頻度を高くした。移動していると判別された場合、子機は定期通報パケットを一定間隔で送信し、このパケットを最も強い電界強度で受信した中継機の周辺にこの子機を持った児童が居ると推定する。ここで定期通報パケットを送信する時間間隔について考える。この時間間隔は短い方がより児童の位置が的確に把握できると考えられるが、実際には中継機単位でしか位置を把握しない。このため、不必要に時間間隔を短くしても同じ中継機の周辺に居続けているという結果となり、さらに子機の電池寿命が短くなってしまう。本システムの中継機は、2-3-2 (2)で後述するが、およそ 200m の間隔で設置されており、また児童の歩行速度を最大でおよそ 4km/h とした場合、200m の移動に要する時間は 3 分である。そこで、行政担当者と相談し、移動時の子機の定期通報パケット発信間隔を 3 分とした。

また、静止状態であれば 1 時間毎に定期通報パケットを保守のために送信する。このように、児童が移動している、つまり登下校時あるいは屋外での活動時と推測される場合のみ、パケットの送信頻度を高くすることにより省電力化を実現した。実際の電池交換時期は、使用状況により異なるが平均で 5.1 ヶ月である事を確認している。つまり、1 回の電池(単 4 電池 2 本)交換で、1 学期(約 4 ヶ月)の間は電池交換なしで利用し続けることを可能としている。

我々は、本システムの中継機網を利用したバスロケーションシステムなどに利用するため、GPS 搭載型子機についても開発を行っている。そこで、この GPS 搭載型子機の特性をもとに、前述したパケット送信頻度における、GPS を搭載した子機とそうでないものとの電池寿命の差についても検討を行った。GPS モジュールの使用に際しては、消費電力の大きい衛星情報の取得動作を 1 時間に 1 回に留め、この情報を記憶して利用するなどの様々な省電力の工夫を行なった。その結果、GPS 搭載型子機の場合、単 4 乾電池 2 本の電池容量で 8.9 日の電池寿命となることが判明した。これは、ほぼ 1 週間に 1 回の電池交換が必要となることを示しており、1 学期の間電池をもたせるとする目標には遠く及ばない。

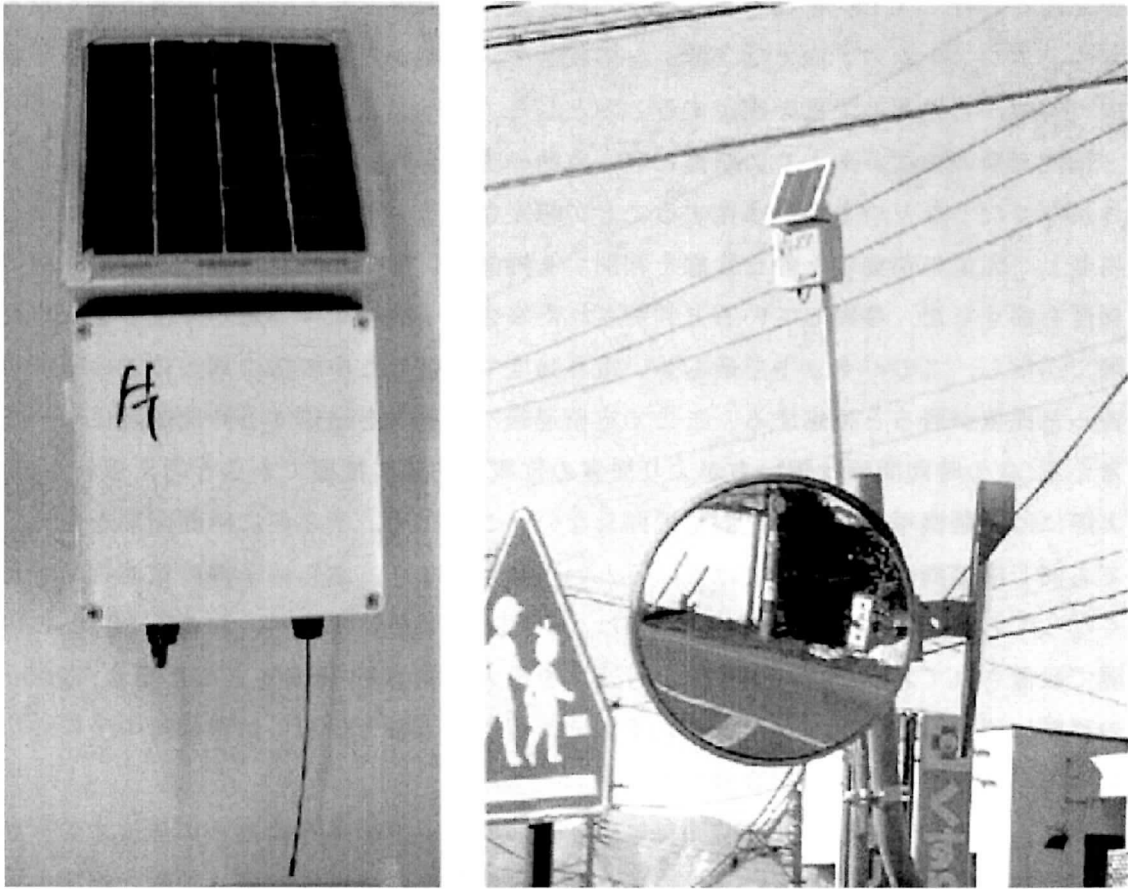


図 2.6. 中継機

さらに、前述のとおり緊急ストラップが装備されており、児童がこれを引き抜いたときに緊急通報パケットが送信される。

## (2) 中継機

本システムにおいて、市内に複数設置して子機からのパケットを中継する中継機の外観を図 2.6 に示す。中継機は、子機からのパケットを受信し、そのパケットに受信電界強度情報を付加したパケットを生成し、これをサーバへと中継する。基本的な仕様については、寸法が  $W185\text{mm} \times H370.5\text{mm}$  (アンテナ含まず)  $\times D130\text{mm}$ 、重量が  $2.5\text{kg}$  及び通信可能距離が見通しで約  $500\text{m}$  となっている。

中継機は、電源と既存の通信インフラが無くても容易に設置できることを目指す。そこで、太陽光パネルと 2 次電池で駆動し、中継機同士が独自の無線ネットワークを形

成する方法とした。ルーティングプロトコルとしてディスタンスベクタなテーブルを基に駆動されるプロアクティブルーティング方式を採用、通信可能な他の中継機と自律的な Ad-Hoc ネットワークを構成し、サーバまでのルートを独自に形成する[9]。

塩尻市内における中継機は、下記の方針に従って配置した。

- a. 市街地においては、およそ 200 m 以下の間隔で 2 次元的に配置する。
- b. 山間地については、通学路が山間の道路 1 本であることが多いため、道路に沿っておよそ 200 m 以下の間隔で線的に配置する。

市街地における実際の配置例を図 2.7 に示す。また、山間地における実際の配置例を図 2.8 に示す。

ここで、Ad-Hoc ネットワークとしての特徴である、ダイナミックな経路の再構成の状況を調査するため、各中継機が発するパケットのログ情報について解析を行った。サンプル期間は、10 月 1 日 0 時から 24 時までの 24 時間とした。この間、ルートが確保され機能していた中継機は 602 台存在し、この中の 41 台でルート変更が観測された。さらに、この中の 10 台については 2 回以上のルート変更が観測され、最高で 4 回のルート変更が行われた中継機が存在することも確認された。中継機は、現在転送先として利用している中継機へのパケット転送が不能となった場合のみ、新たにルーティングを行い経路の再構成を行う。つまり、ルート変更の発生は、何らかの物理的な環境の変化により、各中継機間における受信電界強度の低下が発生していることを示唆している。このことから、市街地という環境の変化が著しいロケーションにおいても、Ad-Hoc ネットワークにおけるダイナミックなルーティングの更新により最適なルートが確保されていることが確認した。

### (3) 無線規格

子機のパケット通信及び中継機回線の無線通信には、省電力で回折性の高い特定小電力無線(周波数 429MHz, 出力 10mW)[10]を採用した。変調方式は 2 値 FSK, 符号化方式にはマンチェスター符号を採用し、実効通信速度は 1200bps である。





図 2.7. 市街地における中継機配置状況



図 2.8. 山間地における中継機配置状況

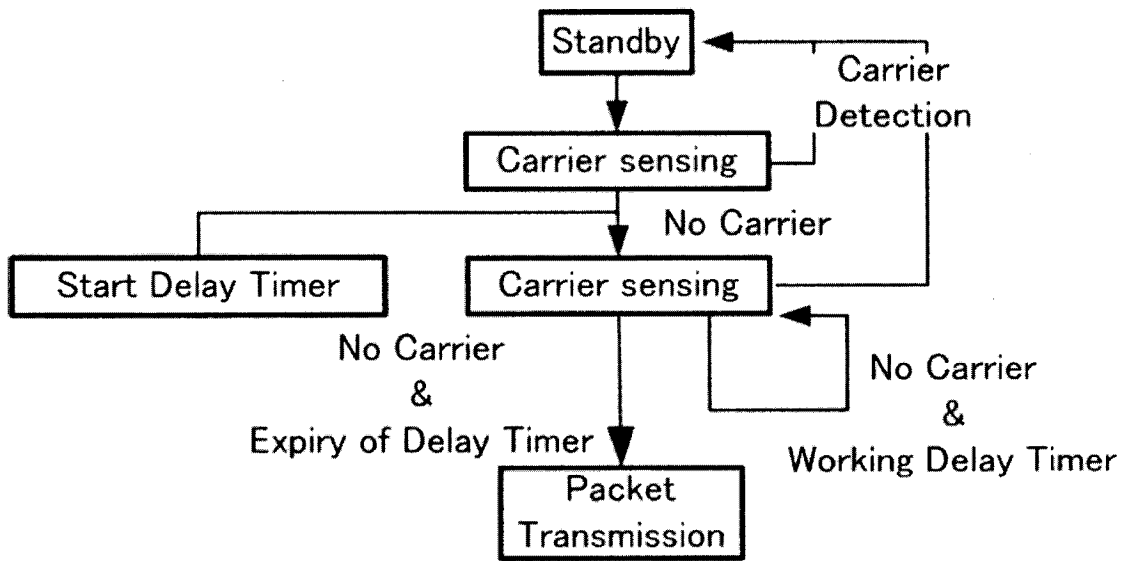


図 2.9. ARIB STD-T67 のシーケンス

#### (4) サーバ

サーバは小学校に置かれ、中継機が中継してくる子機からのパケットを基に各児童の位置を特定し、2-3-1 (2)で述べた各種サービスを実行する。各中継機は、受信した子機パケットを転送する際、その受信電界強度を付加して転送する(2-3-3 (2)で詳述)。位置推定の方法として、複数の中継機がパケットを転送してきた場合、それらの受信電界強度の比と中継機の座標をもとに子機位置を計算で求める方法が考えられる。この手法について本システムにおいて試験的に導入を行ったところ、子機と身につけている児童の人体との位置関係や、車両の通過など子機の周辺状況に大きく依存してしまうため、位置推定が非常に不安定であることが確認された。このため、位置精度は荒くなってしまうものの、受信電界強度の最大値を示す中継機的位置を、子機の現在位置として利用している。ただしこの手法の場合、陸橋の上など子機の見通し状態によっては、近傍の中継機よりも非常に離れた場所にある中継機の受信電界強度が高くなることもあり、位置推定の精度が著しく低下することがある。この事については4-6-1で詳細な検討を行う。

#### 2-3-3 通信プロトコル

子機 - 中継機間及び、中継機 - 中継機間の通信プロトコルは、特定小電力の ARIB

Preamble	Bit synchronization	Frame synchronization	Information (variable length)	Check Sum
24bit	33bit	31bit	16~296bit	16bit
	Bit synchronization	Frame synchronization	Information (variable length)	Check Sum
	Bit synchronization	Frame synchronization	Information (variable length)	Check Sum

Preamble : 101010 ... 101010      consecutive bit string

Bit synchronization : 101010 ... 1010101      consecutive bit string

Frame synchronization : X000 | 1101 | 1101 | 0100 | 0010 | 0101 | 1001 | 1111  
 (MSB is disregarded)

図 2.10. データフォーマット

Packet type	Packet length	Terminal ID	Packet No.
1byte	1byte	2byte	1byte

Packet type: 11H Terminal periodical packet (move)  
 12H Terminal periodical packet (still)  
 13H Terminal emergency packet

図 2.11. 子機が送信するパケット構成

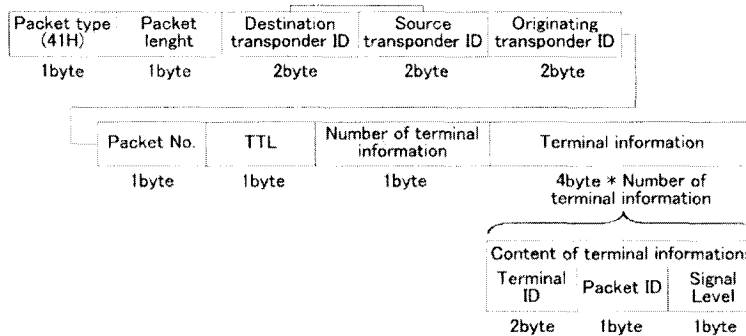


図 2.12. 中継機が送信するパケット構成

STD-T67に準拠している（図 2.9 参照）。しかし、第 3 章において詳しく述べる改良を施すことにより、地域見守りシステムとしての問題点を克服したプロトコルとしている

#### (1) 再送回数

子機及び中継機が送信を行った後、子機は中継機からの、中継機はルート上次の中継機からの ACK を待つこととなるが、定められた時間が経過しても ACK を受信できなかった子機は、パケットの再送を試みる。本システムでは、この再送は 7 回までとし、7 回再送しても ACK が受信できなかった場合はそのパケットを破棄することとした。

#### (2) パケット構成

子機及び中継機が送信するパケットのデータフォーマットは、図 2.10 に示すとおりである。フォーマット中の、実際にデータが格納される情報部については可変長であり、1 パケットあたり 16~296bit となっている。これを超える情報を送信する場合は、ビット同期以下を必要な情報量の分だけ繰り返す。

子機が送信するパケットの情報部は図 2.11 に示すとおりである。基本的に自身の ID と、発呼順にふられるパケット番号であり、先頭の電文種別により定期通報（通常及び無振動時）か緊急通報であるかを識別する。

中継機が送信するパケットの情報部を図 2.12 に示す。子機情報は、受信した子機パケットに受信電界強度（00H~55H）を付加したものであり、受信期間である 10 秒間に到着した複数の子機パケットを再構成して 1 つのパケットとする。また、TTL（Time To Live:中継回数）は、発呼元の中継機で 0AH が設定され、中継が行われるごとに-1 される。これが 0 になった段階で中継は中断されパケットは破棄される。

## 2-4 結言

本章では、地域見守りシステムとして運用されている、長野県塩尻市における無線 Ad-Hoc ネットワークシステムについて、各構成要素についてその詳細を述べた。

中継機網については、各中継機が太陽光発電パネルと 2 次電池により駆動されること、通信回線が無線による Ad-Hoc なマルチホップネットワークであることにより、完全に自立して機能するものである。このため、災害時等でも被災しなかった中継機

により自動的にネットワークが再構成され、災害対応の情報インフラとして機能することが可能となっている。

大規模災害の発生時において最も弱者と考えられるのは、やはり高齢者と子供である。これら弱者の安否と所在の確認、さらには適切な避難所へ避難できているか等の情報は、災害発生の初期における救助・保護において非常に重要な情報である。本地域見守りシステムは、高齢者の見守りシステムとしての利用拡大について、現在塩尻市において検討が行われている。この拡大が実現すると、災害弱者である高齢者と児童が子機を所持することになる。また、児童の見守りのため小中学校周辺に中継機が重点的に配置されているため、災害時に避難所として利用される施設における通信環境は良好である。従って、本地域見守りシステムは、災害時における災害弱者の安否確認システムとしても機能するものである。

また、平時から地域見守りシステムとして運用されていることにより、災害時にも情報インフラとして即応することが可能な状態が維持されている。

## 参 考 文 献

- [1] “地域児童見守りシステムモデル事業 事例集 “,総務省情報流通行政局情報通信利用促進課, January 2009
- [2] “モバイルアドホックネットワークにおけるスケーラブルグループメンバー確認技術に関する研究開発”, 総務省戦略的情報通信研究開発推進制度報告書,2008
- [3] Atsushi Ito, Yoshiaki Kakuda, Tomoyuki Ohta, and Shinji Inoue, "New safety support system for children on school routes using mobile ad hoc networks," IEICE Transactions on Communications, vol.E94-B, no.1, pp.18-29, January 2011.
- [4] 武内 保憲:高精度位置検知システムを適用した子ども見守りシステムの開発;電子情報通信学会技術研究報告. USN, ユビキタス・センサネットワーク 108(399), 145-148, 2009-01-15)
- [5] 近井大道, 大村周平, 新村正明, 國宗永佳, 本山栄樹, 不破泰 : 改良した無線ネットワークプロトコル ARIB STD-T67 の実装と評価 ~ 近接中継機の重複パケット送信抑制 ~; 電子情報通信学会技術研究報告, 108, (457), NS2008-199, pp.315-320, Mar. 2009.
- [6] “デジタル防災無線高度利用調査検討会~児童の安心安全確保に向けて~ 報告書”, 総務省信越総合通信局, デジタル防災無線高度利用調査検討会, March 2007
- [7] 不破泰, “高耐障害性アドホックネットワークシステム”, 電子情報通信学会誌 Vol.91, No.10, pp862-864(2008)
- [8] 中西一貴, 堀尾伸治, 新村正明, 國宗永佳, 本山栄樹, 不破泰 : 無線 Ad-hoc ネットワークを用いた地域見守りシステムの開発と評価 ; 電子情報通信学会技術研究報告(通信方式), 108, (279), CS2008-27,pp.12-18,(阿寒) Nov. 2008.
- [9] 不破泰, 堀尾伸治, 中西一貫, 新村正明, 國宗永佳, 本山栄樹 : [招待講演] 無線アドホックネットワークを用いた地域見守りシステムについて ; 電子情報通信学会技術研究報告(アドホックネットワーク)AN2008-38, 108, (251), pp.51-58, (那覇市)Oct. 2008.
- [10] “特定小電力無線局 400MHz 帯及び 1,200MHz 帯テレメータ用, テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備標準規格”, 社団法人電波産業会 May, 2007

## 第3章

# 地域見守りシステムにおける 無線プロトコルの改良

## 第 3 章

# 地域見守りシステムにおける

## 無線プロトコルの改良

### 3-1 緒言

2005 年度から 2007 年度にかけて塩尻市内の 1 小学校区で行った実証実験の結果、児童が持つ端末から発信されるパケットの損失率が比較的高いことが明らかとなった。損失の原因を明らかにするために端末からのパケットおよび固定局からのパケットを観察した結果、以下に示す 2 つの事象が大きな影響を与えていることが明らかとなった。

- (1) 1 つの固定局エリアに多数の端末が集中すると、コリジョンが多発しパケット損失が発生。
- (2) 端末からのパケットを複数の固定局が受信した場合、この複数の固定局が ACK の返信を行い、またパケットの中継を行うため回線の混雑が発生[1]。

そこで、本システムではこれらの問題を解決するため、ARIB STD-T67 に新たに 2 つの改良を加えて利用している。

本章では、(1)について図 3.1 に示すモデルにより検討され、この問題を解決するために提案された 3-3 で示すプロトコルの効果について述べる。同様に、(2)について図 3.8 で示すモデルにより検討され、この問題を解決するために提案された 3-4 で示すプロトコルの効果について述べる。また、実際にシステムで使われている中継機と子機に提案プロトコルを実装して行われた評価実験について述べ、シミュレーションの妥当性についても述べる。

ただし、パケット損失の原因はさらに様々な要因が考えられるが、すべてについて検証を行うことは不可能である。このため、本章では、実証実験において損失の顕著な原因として特定された(1)(2)についての対応策として 2 つの改良プロトコルを扱う。



### 3-2 プロトコルの評価基準

本システムの端末は移動中であることを検出すると 3 分毎にパケットを送信する。このため、このパケットが 1 回失われると、3 分後に次のパケットがサーバに届くまでの間、その子機を持っている児童の位置が特定できなくなる。そこで、システムの運用主体である塩尻市と、この端末が発信したパケットがサーバに届かない割合（以下パケット損失率と呼ぶ）の許容範囲を検討した。

まず小学校関係者への聞き取りを行い、塩尻市に居住する児童の通学時間が、最大で約 30 分であることを把握した。本システムでは、子機パケットから児童の位置を推定するため、この通学時間中におけるパケット損失を可能な限り回避したい。ここで、パケットの損失率を 5%と仮定すると、30 分間の移動時には子機から 10 パケット送信されるため、パケットが全く損失しない確率は 0.60 となる。また、10 パケット中パケットが 1 つだけ損失する確率は 0.32 となる。このことから、30 分の移動中に、パケットが全く損失しないかあるいは 1 つのみ損失する確率は 0.92 となる。従って、通学時間中のパケット損失が 1 パケット以下となる確率が 0.9 以上となるため、塩尻市との協議の結果、このパケット損失率 5%をシステムの許容限度とした。

そこで、本章のプロトコル評価においては、子機がパケットの送信を試みたにもかかわらず、それを破棄してしまうか、中継機網の中で損失してしまう割合を以降損失率と定義し、この損失率が 5%以下であることをプロトコルの評価尺度とする。

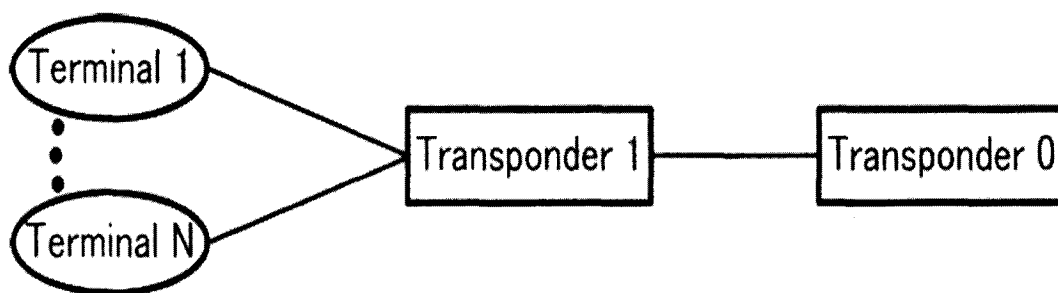


図 3.1. ネットワーク構成 1

### 3-3 子機の集中による問題

地域見守りシステムの特徴として、登校時間など児童が特定の場所に集中する時間帯が必ずあり、子機が1か所に多数集中する状況が頻繁に発生する。本システムの子機は、アクティブタグであり定期的にパケットを送信しているため、このような状況では送信の衝突によるパケット損失が多発することとなる。

#### 3-3-1 問題のモデル化

前述の状況を、簡単なモデルとして表したものが図 3.1 である。図中の実線はお互いに直接パケットの授受が可能な状態を表す。以降、この状態をさらし状態と呼ぶ。実線で接続されていない機器は、お互いにキャリアが見えないことを示す。以降、この状態を隠れ状態と呼ぶ。

子機群と中継機 1、中継機 1 と中継機 0 は互いにさらし関係である。子機群と中継機 0 はお互いに通信状況が把握できない隠れ関係である。また、子機群内はお互いに全てさらし関係とする。この構成において、任意の子機がパケットを送信し、中継機 1 が受信する。中継機 1 は子機に対して ACK を送信し、その後中継機 0 にパケットを転送する。中継機 0 はそれに対する ACK を中継機 1 に返す。

以上のモデルにおいて、ARIB-T67 のパケット損失率をシミュレーションにより確認したところ、子機群内の子機台数が 120 を超えると、子機群がお互いにさらし関係という比較的良好な環境であっても、パケット損失率が許容範囲である 5% を超えてしまうことが確認された。

図 3.1 の構成において発生するパケットの損失は、中継機 1 の転送パケットの送信終了時、中継機 0 の ACK の送信開始と子機群の送信再開のタイミングが一致して発生するコリジョンに起因する(図 3.2)。これは、中継機 0 と子機群がお互いに隠れ関係にあるため、お互いのキャリアを検出できず、中継機 0 の ACK と子機群のパケット送信再開がコリジョンを起こすものである。

#### 3-3-2 固定長待ち時間の導入

お互いのキャリアを検出できない状況下でコリジョンを回避するため、図 3.3 に示すように、中継機 0 の ACK を優先し、子機群からの送信再開をその後に実行させることとした。

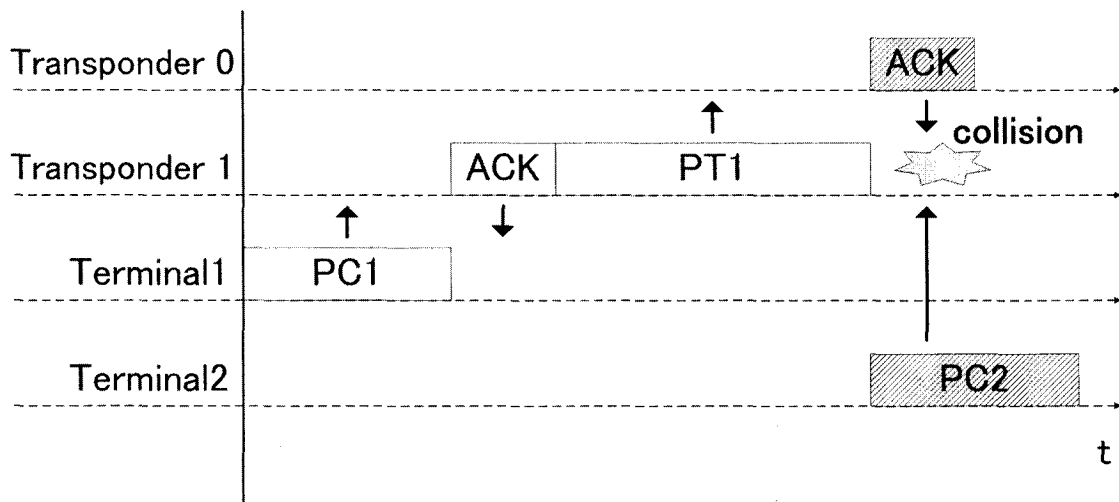


図 3.2. 子機群-中継機 0 のコリジョン

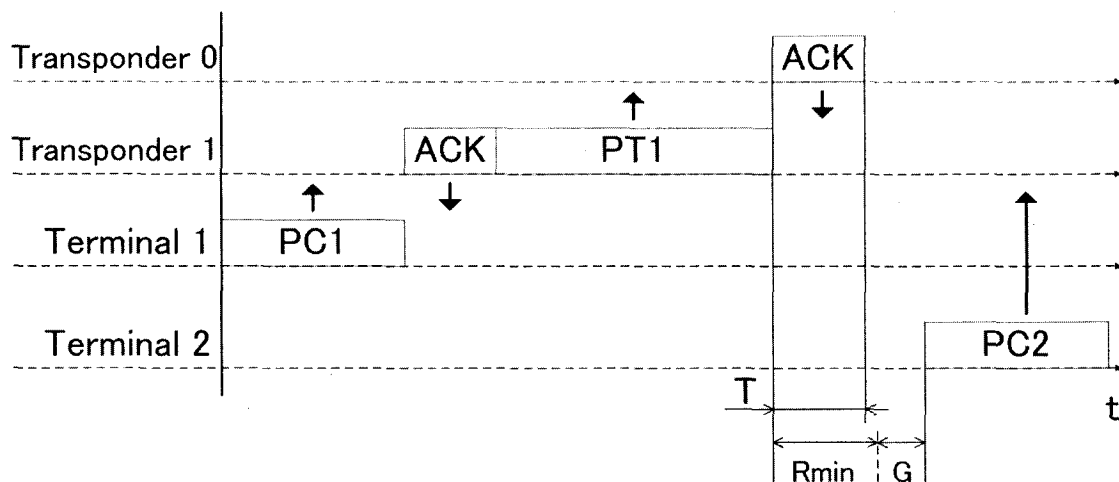


図 3.3. 固定長待ち時間の導入

ARIB STD-T67 では、キャリアセンスでキャリアが検出されなければ、送信遅延タイムの最大値である  $G$  までのランダムな時間待機した後にパケットを送信する。そこで、子機の送信遅延時間の前に IEEE 802.11 DCF における IFS と同様の考えとして固定長の待ち時間を設ける。この待ち時間を  $R_{min}$  とすると、子機はキャリアがないときに  $R_{min} \sim R_{min} + G$  のランダムな時間待ってから送信を開始することになる。ここで、中継機 0 の ACK 送信に必要な時間を  $T$  とすると、コリジョンを回避するため

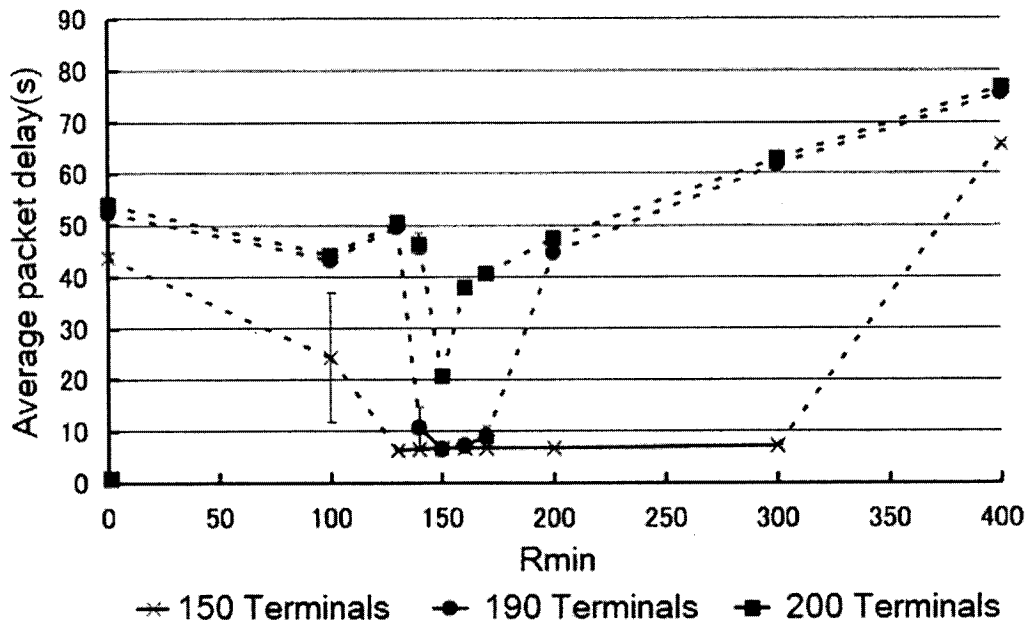


図 3.4. 送信遅延時間と Rmin の関係

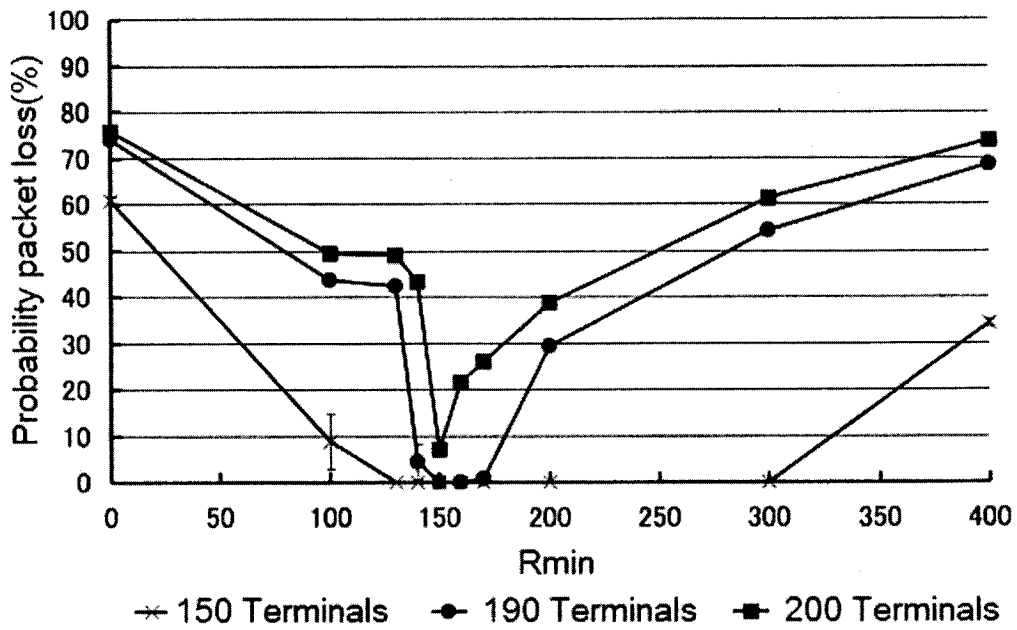


図 3.5. パケット損失率と Rmin の関係

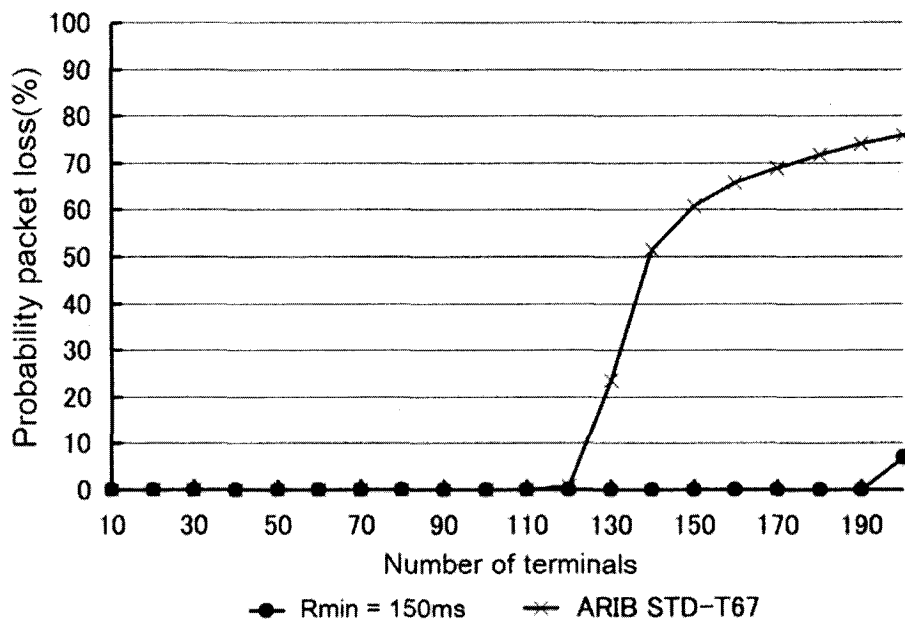


図 3.6. 子機台数の変化とパケット損失率

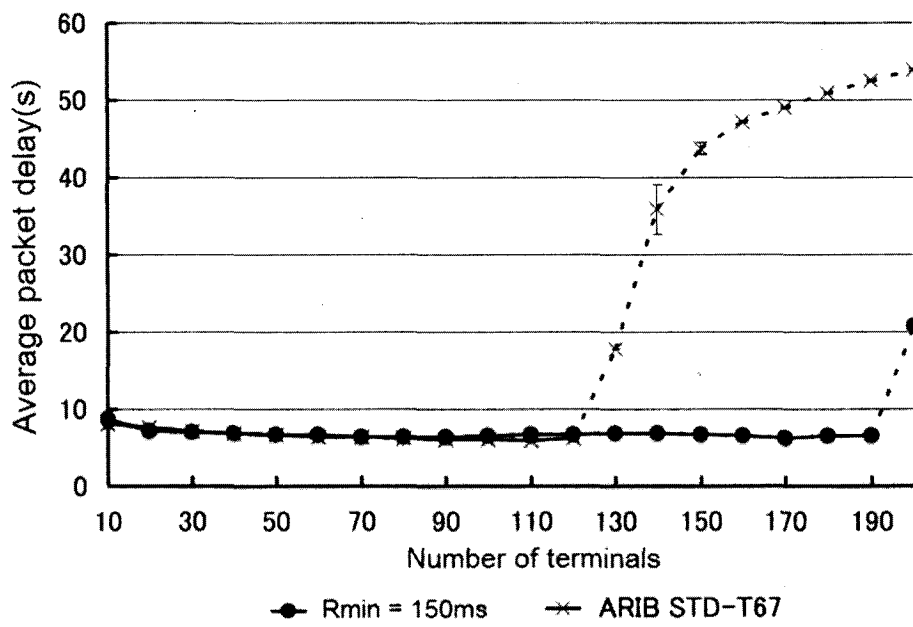


図 3.7. 子機台数の変化と送信遅延時間

には、ARIB STD-T67における送信遅延時間の最大値  $G$  と  $T$  の合計時間  $G+T$  以上に  $R_{min}$  を設定すれば良いことが分かる。しかし、 $R_{min}$  の増加は送信遅延時間の増加につながるため、最適な  $R_{min}$  を確定する必要がある。そこで、子機が 150 台、190 台及び 200 台における、 $R_{min}$  と送信遅延時間及びパケット損失率の関係をシミュレーションにより求めたものを図 3.4、3.5 に示す[2]。横軸は  $R_{min}$ 、縦軸はそれぞれ送信遅延時間とパケット損失率である。図 3.5 では、子機 190 台の時、 $R_{min}$  が 140ms~170ms の間、パケット損失率が 5%以下となっている。□こで、子機台数 150 台及び 200 台の時でも損失率と送信遅延時間が最小となるものとして、 $R_{min} = 150ms$  を最適値として選択する。また、今回の評価に用いたシミュレーションでは、子機群内における子機相互のコリジョンについても考慮している。

$R_{min}$  導入の効果を確認するため、ARIB STD-T67 の場合と  $R_{min} = 150msec$  を導入した場合について、子機の台数を 10 台~200 台まで変化させ、それぞれのパケット損失率と送信遅延時間をシミュレーションにより求めた。その結果を、図 3.6 と図 3.7 に示す。ARIB STD-T67 では、子機が 120 台を超えるとパケット損失率が 5%を超えているが、 $R_{min} = 150ms$  とした場合では 190 台まで許容されている。また、 $R_{min}$  による送信遅延時間の悪化が懸念されるが、子機台数が 190 台を超えるまで送信遅延時間の悪化は見られない。ARIB STD-T67 と比較した場合でも、子機台数が 130 台まではほぼ同様の傾向を示し、120 台を超えるとむしろ改善されていることがわかる。従って、本提案の有効性が示された。

### 3-4 中継機の増設による問題

本システムの中継機は、子機からのパケットを受信し、このパケットに受信電界強度情報を付加してサーバへ転送する。サーバでは、この中継機の情報を用いて現在の児童の位置を推定することとなるため、中継機の密度は高ければ高いほど児童の位置推定精度は高くなる。しかし、子機からのパケットを複数の中継機が受信することとなり、それぞれが ACK の送信とパケットの転送を試みるため、結果としてトラフィックの増大が予想される。

#### 3-4-1 問題のモデル化

狭いエリアに子機が集中し、さらにそのエリア内に複数の中継機が存在することを

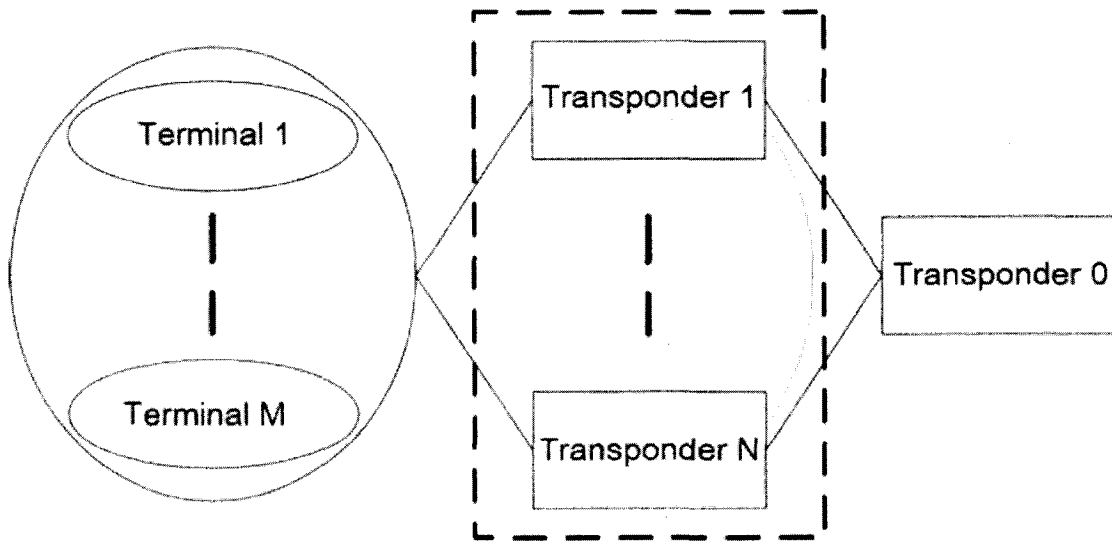


図 3.8. ネットワーク構成 2

想定し、図 3.8 に示す構成を考える。子機は、子機 1～子機 M の M 台存在することとする。また中継機 1～中継機 N は、子機からのパケットを中継する中継機であり、子機から受信したパケットを中継機 0 にそれぞれ転送する。以降、子機 1～子機 M を子機群、中継機 1～中継機 N を同時受信中継機群と呼ぶ。ここで、中継機 1～中継機 N はお互いにさらし関係とし、また子機 1～子機 M はお互いにさらし関係とする。この構成において、任意の子機がパケットを送信し同時受信中継機群が受信する。同時受信中継機群は子機に対して ACK を送信し、その後中継機 0 へそれぞれパケットを転送する。中継機 0 はその転送パケットに対して ACK を送信する。

### 3-4-2 重複抑制プロトコル

トラフィックの増大を回避するため、ここで以下 2 つの改良プロトコルを提案する [1][3]。

**【提案 1】** 同時受信中継機群は、子機に対する ACK 送信を 1 台の中継機以外は抑制する。

**【提案 2】** 提案 1 に加え、ACK を抑制された中継機は子機からのパケットを中継機 0 へ転送しない。

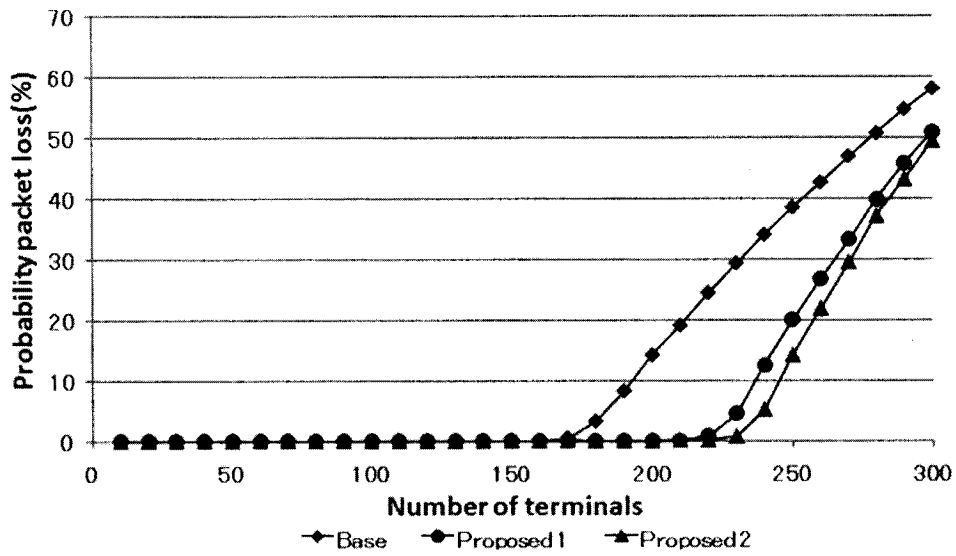


図 3.9. シミュレーションによる基盤プロトコルと提案 1, 2 におけるパケット損失率 (同時受信中継機台数 2 台)

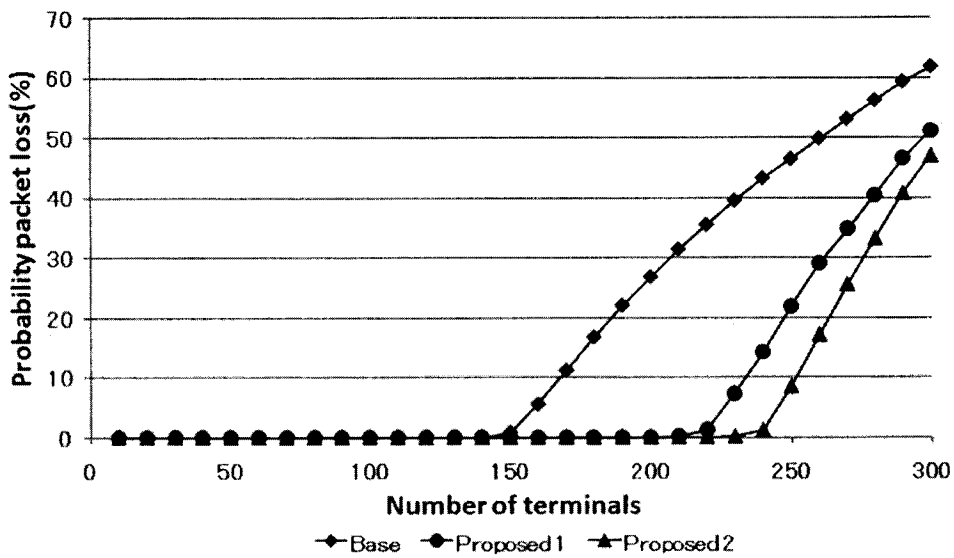


図 3.10. シミュレーションによる基盤プロトコルと提案 1, 2 におけるパケット損失率 (同時受信中継機台数 3 台)



提案 1 では、同時受信中継機群中の 1 台が ACK の返送に成功すると、他の中継機は通信を傍受してそのことを知り、自らの ACK 送信を抑制する。提案 2 では、ACK の送信を抑制した中継機は、パケットの転送も抑制する。この結果、ACK の返送に成功した中継機のみが子機からのパケットを中継機 0 へ転送することとなる。

提案 1 及び提案 2 の効果を確認するため、シミュレーションによるパケット損失率の評価を行った。塩尻市におけるシステムにおいて、3-1 で述べた問題が発生する状況は、主に小学校周辺で発生している。これは、登校によって児童が学校へ集中するためである。現状における小学校周辺の中継機設置状況は、2 台及び 3 台という事例が多い。そこで、同時受信中継機台数を 2 台としてシミュレーションを行った結果を図 3.9 に、同時受信中継機台数を 3 台とした結果を図 3.22 に示す[1]。

図 3.9, 3.10 は、子機群の台数を 10 台から 300 台まで増加させた時の、子機群の台数とパケット損失率の関係である。また、グラフ中に、3-3-2 で述べたプロトコルのみ、提案 1 を実装した場合及び提案 2 を実装した場合についてそれぞれ示す。この結果から、パケット損失率 5%以下を満たす子機の許容台数を検証する。

中継機が 2 台の場合、3-3-2 で述べたプロトコルでは 180 台であるのに対して、提案 1 では 230 台、提案 2 では 240 台となり大きく改善されていることがわかる。さらに、中継機が 3 台の場合でも、2-5-2 で述べたプロトコルでは 150 台であるのに対して、提案 1 では 220 台及び提案 2 では 240 台と大きく改善されていることがわかる。従って、シミュレーションにおいて本提案の有効性が示された。

### 3-5 実機を用いた評価

提案手法を、本システムで使用している機器に実装し実験を行った。しかし、実験のために準備できる子機の台数が 50 台に制限されたため、シミュレーションと同じ傾向を少ない子機台数で再現するには、ネットワークの負荷を高める必要がある。そこで、本来子機は 3 分に 1 回パケットを送信するところ、30 秒に 1 回パケット送信をするものとして実験を行った。

比較のために、この条件で 3-4 と同様のシミュレーションを行い、基盤プロトコル、提案 1 及び提案 2 について、中継機台数が 2 台の場合のパケット損失率を求めた結果が図 3.11、中継機台数が 3 台の場合のパケット損失率を求めた結果が図 3.12 である。

実機を用いた同時受信中継機群の台数が 2 台と 3 台の場合についての、パケット損

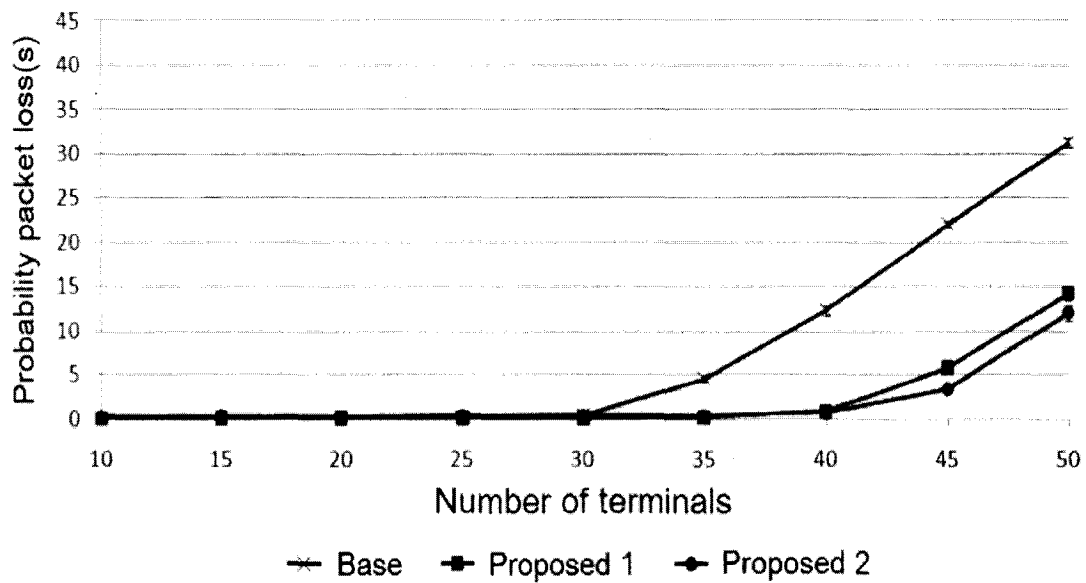


図 3.11 シミュレーションによる基盤プロトコルと提案 1, 2 におけるパケット損失率  
(同時受信中継機台数 2 台)

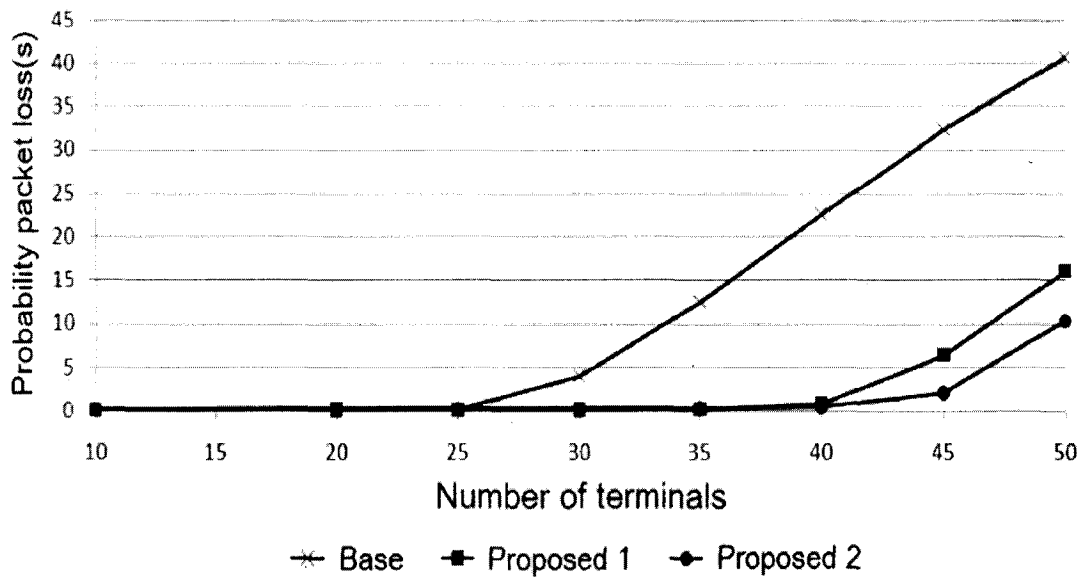


図 3.12 シミュレーションによる基盤プロトコルと提案 1, 2 におけるパケット損失率  
(同時受信中継機台数 3 台)

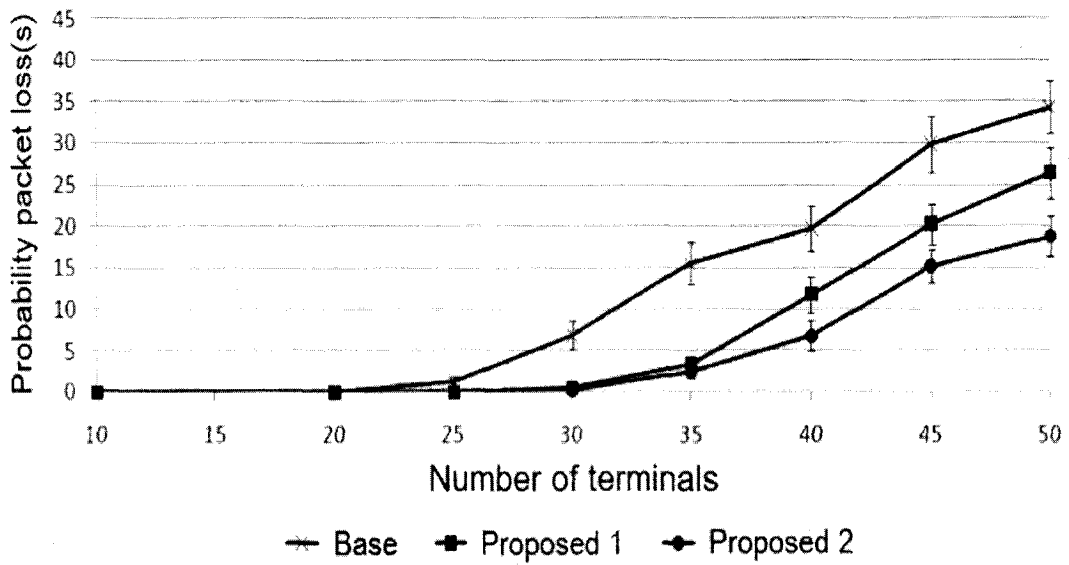


図 3.13 実機による基盤プロトコルと提案 1, 2 におけるパケット損失率  
(同時受信中継機群台数 2)

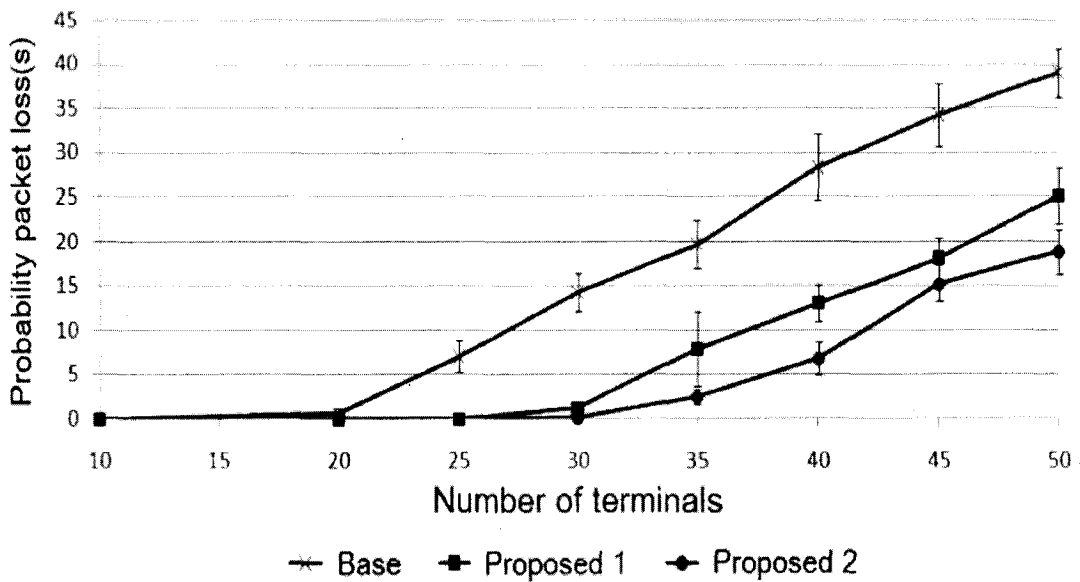


図 3.14 実機による基盤プロトコルと提案 1, 2 におけるパケット損失率  
(同時受信中継機群台数 3)

失率に関する実験結果を図 3.13, 3.14 に示す. また, 各結果の 95%信頼区間を求めグラフ中の各記号上にその範囲を示した.

実験結果において, パケット損失率 5%以下となる子機の許容台数は, 同時受信中継機群の台数が 2 台の場合, 基盤プロトコルでは 25 台, 提案 1, 提案 2 では 35 台と大幅な改善が認められた. また, 同時受信中継機群の台数が 3 台の場合でも, 基盤プロトコルでは 20 台, 提案 1 では 30 台, 提案 2 では 35 台となり, 同様に改善が認められた. 特に, 同時受信中継機群の台数の増加に対して, シミュレーションと同様に改善効果が高いことが確認された. さらに, 提案 2 に関しては, シミュレーションと同様に, 提案 1 に対して改善の効果が低いことも確認された.

### 3-6 送信パケット種別による分析

#### 3-6-1 提案 1 による改善の効果

実機を用いた評価と同様に, 子機は 30 秒に 1 回パケットを送信するものとして, 同時受信中継機群の台数が 3 台, 子機の台数が 10 台の場合のシミュレーションを通信時間 30 分間として 10 回行い, 送信されたパケットの種別総数の平均を求めた結果を図 3.15 に示す. ここでのパケット数とは, 送出したすべてのパケット数であり, コリジョンが発生した場合でもカウントされる.

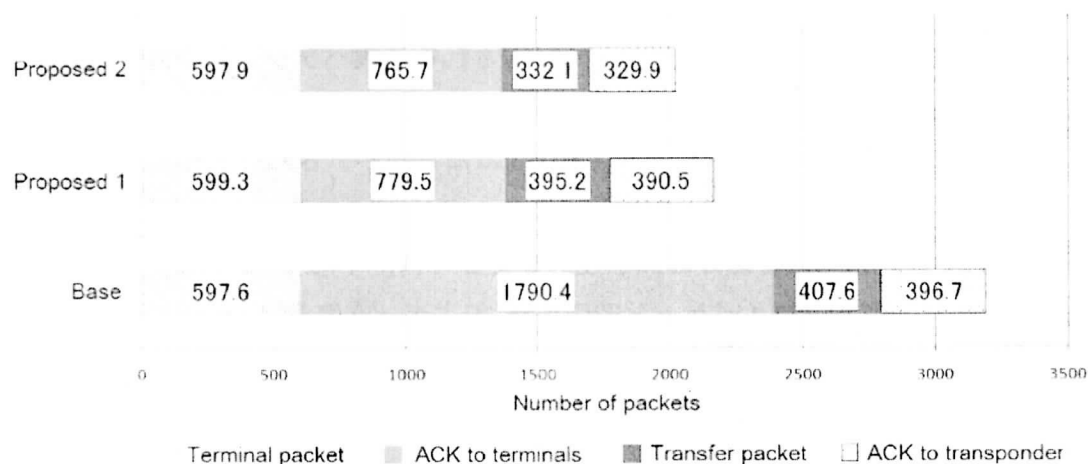


図 3.15. 送信パケットの種別

基盤プロトコルでは、子機パケットに対し 3 台の中継機が ACK を返すため、ACK は子機パケットのほぼ 3 倍となっている。これに対し、提案 1, 2 においては、子機への ACK が明らかに減少している。ただし、基盤プロトコルに比べ当初想定していた 1/3 にはなっていない。子機の ACK が送信される際、2 台の中継機によるコリジョンが発生すると、残りの中継機は正しく ACK を受信できないため、やがて自身も ACK を送信する。このような場合、今回のシミュレーションでは ACK は 3 個とカウントされる。実際、平均して 89.05 回の ACK のコリジョンが確認されており、これが原因で ACK のパケット数が基盤プロトコルの 1/3 にならなかったと考えられる。しかし、基盤プロトコルに比べ ACK のパケットの数は約 43%まで減少しており、大幅な改善が認められた。

### 3-6-2 提案 2 による改善の効果

提案 2 においては、中継機の転送パケットを削減することが目的であったが、図 25 の転送パケット数を提案 1 と比べた場合、1/3 とはなっていない。

同時受信の中継機群が中継機 0 に対して子機パケットの転送を行う際の転送パケットの構成は、複数の子機パケットを一時的に保存し、最初の子機パケットの受信から 10 秒経過した段階で、保存されているパケットをまとめたパケットとして再構成される。転送パケット内の平均子機パケット数は、提案 1 において 4.57 パケット、提案 2 においては 2.36 パケットであった。提案 2 における転送パケット内の平均子機パケット数が少ないのは、10 秒間で中継機内に保存される子機パケットの数が減少しているためである。これは、1 つの転送パケットで転送される子機パケット数の減少を招き、結果として転送パケットの数を増加させることとなる。このため、提案 1 の転送パケット数に対し、提案 2 の転送パケット数が 1/3 にならない。さらに、提案 1 においては、平均 4.57 子機パケットをもつ転送パケットが平均 395.2 パケット送信され、転送データ容量は 127,358bit であった。一方、提案 2 では、平均 2.36 子機パケットをもつ転送パケットが平均 332.1 パケット送信され、転送データ容量は 99,521bit となり、提案 1 に比べて大幅なデータ量の削減には至っていない。このことが、提案 2 のパケット損失率が提案 1 に比べて大幅に改善しない理由であると考えられる。

### 3-7 中継機及び回線容量の検討

1台の中継機が許容可能な子機群台数の最大値  $N_{max}$  は、子機が3分に1回送信を行うことから計算で求めることが可能である。子機の送信間隔 (3min) を  $T_{interval}$ 、子機パケットの送信にかかる時間 (118.8msec) を  $T_{te}$ 、中継機から子機へのACK送信にかかる時間 (118.8msec) を  $T_{AckTe}$ 、中継機間において1件の子機情報を乗せた転送パケットの送信にかかる時間 (184.8msec) を  $T_{tr}$ 、中継機間のACK送信にかかる時間 (132.0msec) を  $T_{AckTr}$  とすると、 $N_{max}$  は以下の式により与えられる。

$$N_{max} = \frac{T_{interval}}{T_{te} + T_{AckTe} + T_{tr} + T_{AckTr}}$$

この式にそれぞれの数値を代入すると、 $N_{max}$  は324台となる。

プロトコルのパケット損失率を5%以下に抑制可能な240台という子機台数は、この  $N_{max}$  の74%に相当する。これは中継機及び回線においてかなり負荷の高い状態ではあるが、シミュレーションの結果から、システムとして問題なく利用できる範囲であると考えられる。

### 3-8 結言

固定長待ち時間及び重複抑制プロトコルの導入により、中継機が3台隣接する狭いエリアに子機が240台集まるといふ、地域見守りシステムにおいてはかなり過酷な条件においても、通信路におけるパケット損失率を5%以下に抑制することが可能であることが確認された。

ここで、この240台という子機の許容台数を、長野県塩尻市における小学校の現状に照らして考察する。狭いエリアに集中する子機群台数の最大値は、各小学校における所持児童数と考えることができる。現在のところ、最も所持児童数の多い小学校で70人程度であり、各小学校の全児童数が約500人であるため、所持児童の割合は約14%程度である。しかし、システムは順次拡大を続けており、この割合が最大で40%程度まで増加することを想定すると、各小学校における所持児童数の最大値は約200人と見込まれる。この値は、本提案によりパケット損失を5%以下に抑制可能な子機台数である240台以下であり、塩尻市における地域見守りシステムのプロトコルとして、問題なく利用することが可能である。

## 参 考 文 献

- [1] 近井大道, 大村周平, 新村正明, 國宗永佳, 本山栄樹, 不破泰 : 改良した無線ネットワークプロトコル ARIB STD-T67 の実装と評価 ~ 近接中継機の重複パケット送信抑制 ~ ; 電子情報通信学会技術研究報告, 108, (457), NS2008-199, pp.315-320, Mar. 2009.
- [2] 不破泰, Herman AGUIRRE, 織田浩敬, 武田智博, 不破かおり, 本山栄樹, “端末数が多い無線通信におけるアクセスプロトコル ARIB STD-T67 の評価と改良,” 信学技報, RCS2007-128, pp.91-96, Dec, 2007
- [3] 不破 泰, 新村 正明, 國宗 永佳, 近井 大道, 内田 博子, 大村 周平, 本山 栄樹, “無線ネットワークプロトコル ARIB STD-T67 の改良 ~ 近接中継機の重複パケット送信抑制 ~” ,電子情報通信学会技術研究報告(情報ネットワーク), NS2007-205, (名護市) (2008.3.7)

## 第4章

# パケット損失率と利用者アンケートによる 地域見守りシステムの評価



## 第 4 章

# パケット損失率と利用者アンケートによる 地域見守りシステムの評価

### 4-1 緒言

長野県塩尻市に構築した本システムの子機には、1 学期の間電池交換をしなくても良いという条件を課しているため省電力であることが求められる。そこで、子機は児童が移動していることを検出した場合のみ、3 分に 1 回パケットを発信することとし、パケットの発信を最小限に留めた。児童の位置推定は、このパケットを最も強い電界強度で受信した中継機の位置を児童の位置とすることで行う。つまり、リクエストに応じて子機が自身の位置を報告する方式、予め指定されたゲートを児童が通過するとその事実を報告する方式等とは異なり、子機からのパケットが失われると、次パケットが受信されるまで児童の新たな位置を推定することが出来ない。従って、子機からのパケットの損失率は、本システムの位置推定の精度低下に大きな影響を与えることになる。そこで、位置推定の精度を、測位精度、中継機網の堅牢性とパケット損失率、及び各子機のパケット損失率をもとに評価を行う。

評価は、まず測位精度について、本システムで採用している位置推定手法が、適切に児童位置を追跡可能であることを実験により確認する。また、中継機網のパケット損失率について、中継機パケットのログデータからパケット損失率を算出し、3. 章で設定した損失率をもとに評価を行う。さらに、子機パケットの損失について、サーバまで到達した各子機パケットのログを解析し各子機のパケット損失率を算出し、2-3 で設定した損失率をもとに評価を行う。

また、実際にシステムを利用している児童の保護者に対してアンケートを行い、このアンケート結果をもとにシステムに対する満足度と問題点を解析する

## 4-2 システムの現状

本システムでは、基本的な構成を構築した後、2005年度から3年間実証実験を実施した。この結果を基に、システムに対し2-5で述べた改良などを加え、2008年度から児童見守りシステムとして実運用を開始した。

### 4-2-1 子機台数

利用者数における運用規模を表4.1に示す。表からもわかるとおり、運用規模は順次拡大している。

### 4-2-2 中継機網

現時点で、子機の電波到達距離をもとにした中継機のカバーエリアは、山間地を除く塩尻市内全小学校の通学区域をほぼカバーしている。また、エリア内に設置された中継機の台数は614台となっている。

本システムの中継機は、2-3-2(2)で述べたとおり完全に自律的な駆動が可能となっている。このため、中継機の設置にあたっては、面倒な配線工事等が一切不要で、屋外の街灯やカーブミラー上に取り付けるだけで完了する。設置が終了すると、中継機は、他の中継機との間にAd-Hocな無線ネットワークを自律的に構成する。このAd-Hocネットワークは、次段の中継機からのACKを受信することができない場合にルーティングテーブルの再構成を行い、常にサーバへの経路を確保する。このように、ネットワークの配線工事が不要であるとともに、経路設定などが自律的に行われるため、広い範囲に多数の中継機を設置しているにも関わらず、ほとんど保守作業が発生しない。この結果として、システムを低コストで運用することを実現している。実際、

表 4.1. 運用規模

年度	2008	2009	2010
利用児童数	375 人	462 人	502 人
中継機台数	413 台	509 台	614 台
対象小学校	9 校	10 校 (全小学校)	10 校 (全小学校)

現在までに中継機に対して行われた保守としては、街路樹の葉が茂って中継機が日陰に入り、太陽光パネルが発生する電力が低下してしまったため、街路樹の葉を刈り込む、あるいは近隣に移設するといった軽微な事例のみである。また、これらの特徴から、停電時でもこの中継機網は運用を続けることが可能であり、特に災害時には、一部の中継機が損失しても、残りの中継機で新たな中継機網を自律的に構成するため持続的な運用が可能である。

### 4-3 測位精度実験

本システムでは、児童が持つ子機から発信されたパケットを、最も強い電界強度で受信した中継機の位置をその児童の位置としている。したがって、児童の位置に応じて、最も近い中継機の受信電界強度が最大になることが求められ、この実現が位置推定の精度に大きく影響する。そこで、各中継機の受信電界強度によって、適切に位置推定が行われていることを確認するための実験を行った。塩尻市のシステムはすでに実運用に供されており、実験のために中継機の設定を変更することが不可能なため、同様のシステムを実験用にスケールダウンして構築している信州大学松本キャンパスにおいて実験を行った。同キャンパスでは、約 48,000 平方メートルの面積中に中継機を 13 台設置しており、中継機間の平均間隔は約 60m となっている。これは、塩尻市における中継機の配置間隔である 200m と比べると 1/3 以下となっているが、各中継機間の距離が短くなると、ある地点からのそれぞれの中継機までの距離の差も短くなり、パケットの各受信電界強度の差に開きが出にくくなる。つまり、受信電界強度を基にする本システムの測位精度実験としては、塩尻市の運用システムよりも厳しい環境での実験となる。

まず、任意の測定点を決定するため、キャンパス内の中継機設置エリアで東西及び南北に 20m 間隔の仮想的な線を引き、それらの各交点を位置測定点とする(図 4.1)。実験では、これら位置測定点で実際に子機からパケットを発信し、各中継機におけるこのパケットの受信電界強度を測定した。さらに、位置測定点と各中継機の距離をもとに、受信電界強度と距離の関係を確認した。

実際には、建物の配置や地形的な問題から測定不能な地点があり、それらを除く 63 の位置測定点で測定を行った。その結果を表 4.2 に示す。最も近い中継機の受信電界強度が最大であった地点は、52 地点であった。これ以外の 11 地点の測定点では、距

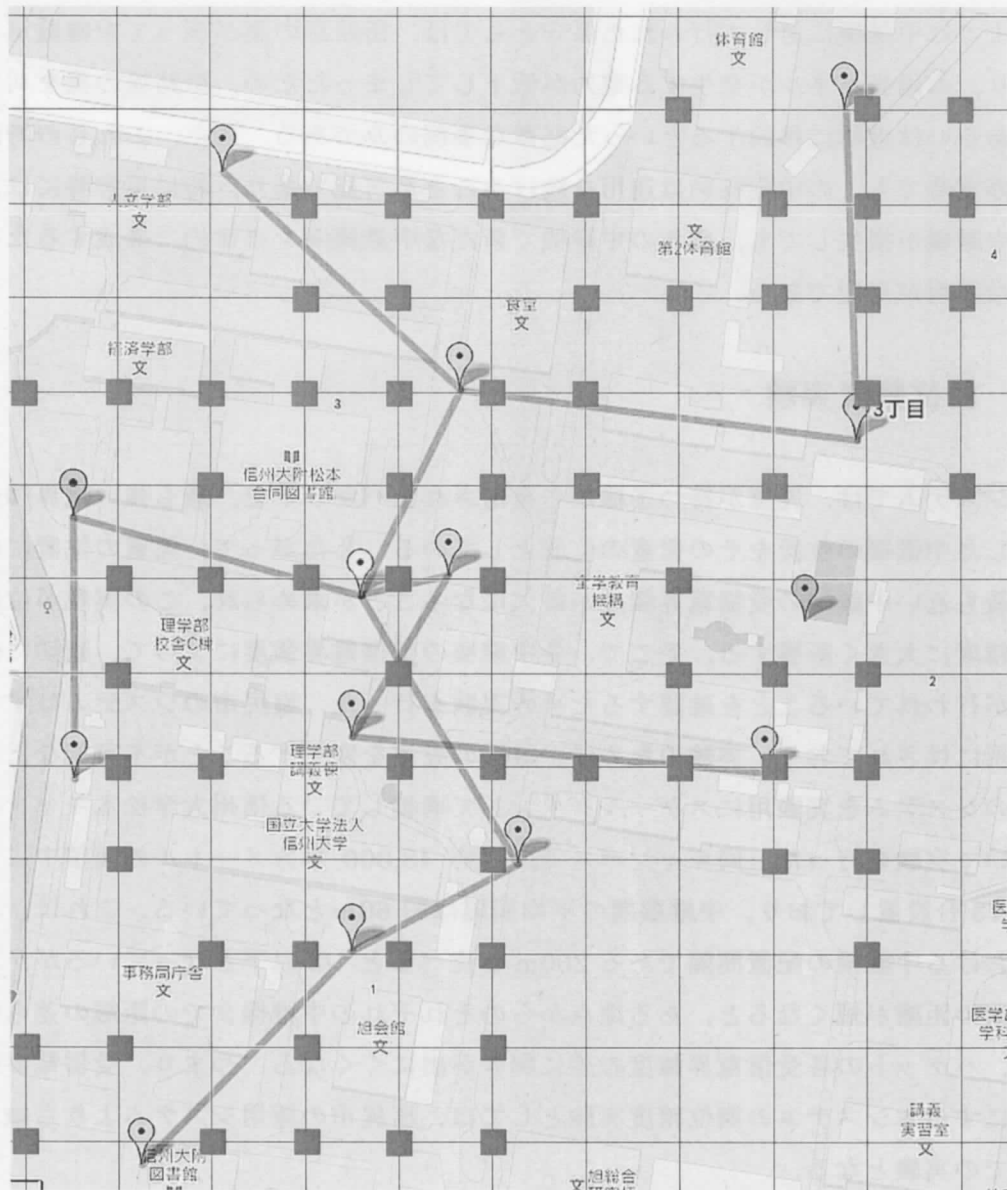


図 4.1. 測位精度実験におけるパケット発信地点

離的に 2 番目に近い中継機の受信電界強度が最大となった。これらについて、建物の配置及び地形等について詳細に検討すると、9 地点では最も近い中継機が建物の陰に回りこんでいた。これらは、見通しから考えると適切な中継機が反応していると考えられることができる。したがって、63 地点中 61 地点 (96.7%) において、適切な位置推定が行われたと考えられる。残りの 2 地点については、建物配置や地形など明らかな

表 4.2. 各中継機が最大の受信電界強度で受信した地点数(中継機までの距離別)

最も近い中継機の受信電界強度が最大	52		
2番目に近い中継機の受信電界強度が最大	11	合理的な説明が可能	9
		明確な原因は不明	2

要因が特定できなかった。街路樹の配置等様々な要因が考えられるが、確定的な原因は不明である。

#### 4-4 中継機網におけるパケット損失率の評価

各中継機が発信するパケットは、全てサーバへ向けて転送され、サーバはこれら受信した全中継機のパケットのログを保持している。また、中継機が発信するパケットの構成は、2-3-3 (2)で述べたとおり図 2.12 に示す構造を持ち、先頭から 9byte が「Packet No.」となっている。これは、中継機毎に、パケットの発信が行われるたびにインクリメントされる値であり、0~255 の間で循環する通し番号となっている。従って、サーバログ中の中継機パケットの「Packet No.」を中継機毎に順に走査し、欠落した「Packet No.」をカウントすることによって、中継機から発信されたもののサーバまで到達しなかった、中継機網で発生する損失パケット数を算定することが可能である。この方法により、2010 年 10 月 1 日から 11 月 28 日までの約 2 ヶ月間をサンプル期間としてパケット損失率を計算し、日毎の推移として提示したのが図 4.2 である。このサンプル期間においては、損失率は 0.5%以下に抑えられ、さらに平均値は 0.13%であった。システムとして許容できる損失率が 5%であることを考慮すると、その通信路としてのパケット損失率として十分に低く抑えられていることが確認された。

ここで、中継機間のルーティング経路の状況について、各中継機のログ情報から解析を行った。サンプル期間中の 10 月 1 日 0 時から 24 時までの 24 時間に注目したところ、ルートが確保され機能していた中継機は 602 台存在し、この中の 41 台でルート変更が観測された。さらに、この中の 10 台については 2 回以上のルート変更が観測され、最高で 4 回のルート変更が行われた中継機が存在することも確認された。中継機は、現在転送先として利用している中継機へのパケット転送が不能となった場合のみ、新たにルーティングを行い経路の再構築を行う。つまり、ルート変更の発生は、

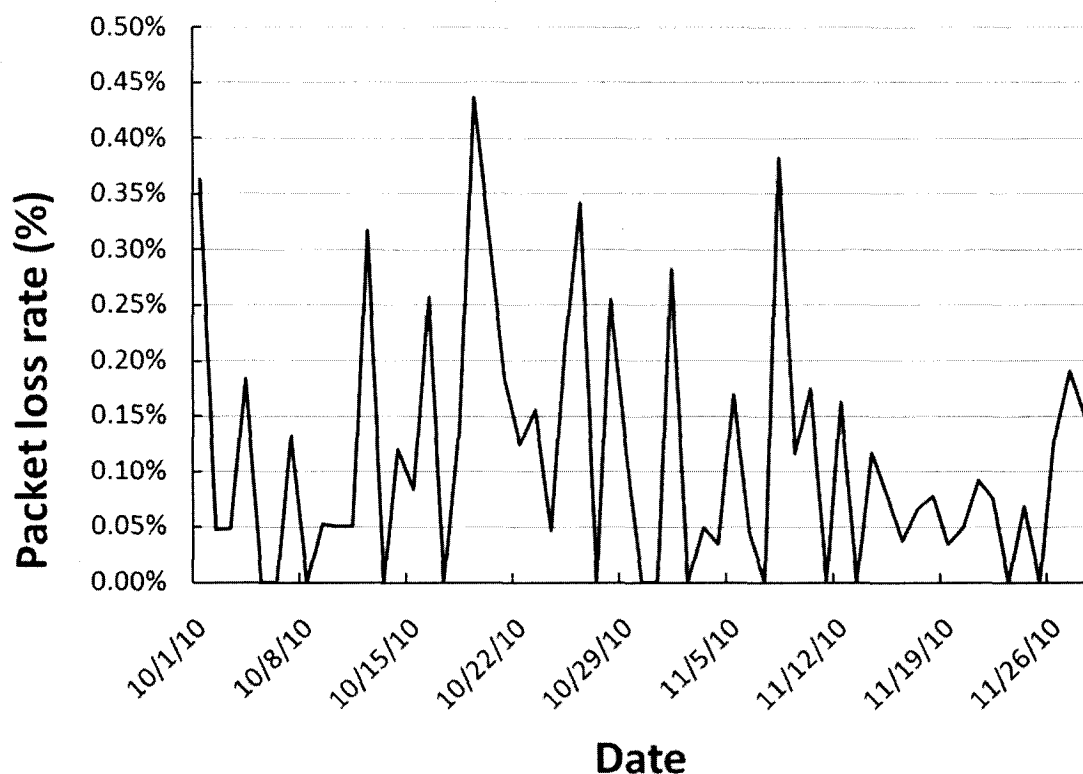


図 4.2. 中継機網におけるパケット損失率

何らかの物理的な環境の変化により、各中継機間における受信電界強度の低下が発生していることを示唆している。このことから、市街地という環境の変化が著しいロケーションにおいても、Ad-Hoc ネットワークにおけるダイナミックなルーティングの更新により最適なルートが確保され、パケット損失率の上昇が抑制されていると考えられる。

#### 4-5 子機パケットの損失率

地域見守りシステムの場合、子機は児童が所持して自由に移動することとなる。比較的回折性の高い 429MHz 帯を使用しても、ビルや車の陰に入ることにより、子機パケットが中継機まで到達しない可能性がある。さらに、最寄りの中継機が子機の電波到達可能距離以遠となる、など児童が中継機のカバーエリア外に出てしまうと、やは

り子機パケットは中継機まで到達しない。つまり、児童の状態によって、発信したパケットが損失してしまう可能性が大きく変動すると考えられる。このため、通信路としての中継機網におけるパケットの損失率を評価するだけでは、地域見守りシステムとしての評価を行ったことにはならない。

子機が発信したパケットは、その子機の位置を推定するためにすべてサーバに集められる。サーバは、これら過去に受信した子機パケット全てについてそのログを保持している。また、子機パケットは、2-3-3(2)で述べたとおり図 2.11 に示すパケット構造をもっており、最後の 1 byte が「Packet No.」となっている。この Packet No.は、パケットの発信ごとにインクリメントされ、0～255 の間で循環する通し番号となっている。このため、ログに残された各子機パケットの Packet No.を順に走査し、欠落している Packet No.をカウントすることにより失われたパケット数を子機ごとに算定することが可能である。

そこで、サンプル期間として児童が普通の登下校を行った下記期間を対象としてパケット損失率を調査する。

(1) 対象日：2010 年 12 月 13 日(月)～17 日(金)

(2) 対象時間：(1)の各日 6 時～8 時、14 時～17 時(小中学生の登下校時間に相当)

また、パケット損失率を求めるにあたっては、児童が実際に持ち歩いている子機を対象として計算を行う必要があるため、下記の条件を設定する。

- (1) 全くログが残っていない子機に関しては、使われていないものとして計算の対象から外す。
- (2) 上記サンプル期間において、パケット数が 30 以下の子機は、児童が持ち歩いていないものとして計算の対象から外す。

この結果、ログから調査対象として抽出された子機の台数は 290 台であった。ここで、表 4.1 の運用規模において示した子機台数と、抽出された子機台数には 200 台以上の差が認められる。これは、表 4.1 の子機台数は、年度当初の 4 月に購入された子機台数であり、調査が行われた 12 月までに何らかの理由により利用されなくなってしまった子機が存在するためである。

損失率の計算にあたっては、まず対象とする各時間帯別・各子機別に、最初に到達したパケットの Packet No.から最後に到達したパケットの Packet No.まで順に走査

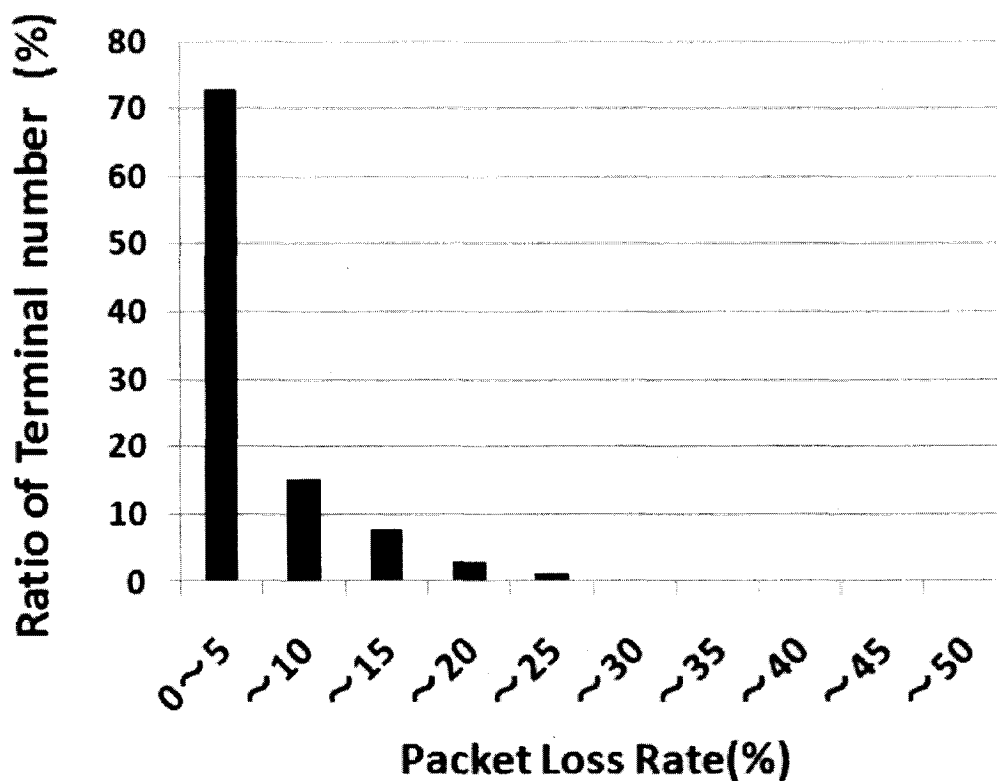


図 4.3. 子機の packets 損失率の分布

し、欠落した packets 数をカウントすることにより各子機の損失 packets 数をもとめる。さらに、各子機が送出した packets 総数に占めるこの損失 packets 数の割合により損失率を計算する。また、子機毎の packets 損失率は、上述により求めた時間帯別の損失率の全ての時間帯の平均値とする。以上により全子機の packets 損失率の平均値を求めたところ、3.83%であった。これは、システムの目標としている packets 損失率 5%を下回っているが、さらに各子機の損失率の分布を検証する必要がある。そこで、各子機の損失率の分布をヒストグラムとして図 4.3 に示す。これによると、損失率が 5%以下の子機が全子機中 72.8%を占めていることが確認された。しかし、一方で損失率が 5%を超える子機が、全体の四分の一以上となる 27.2%存在していることになる。地域見守りシステムとして考えた場合、理想的には子機を持つ全ての児童の状態が問題なく監視できる、つまり全ての子機の packets 損失率が 5%以下であることが求められるため、この割合は無視できないものとなる。そこで、どのような状



況においてパケット損失率が悪化しているのか分析するため、パケット損失率が 5% を超える子機 79 台について使用状況の調査を行った。この結果、子機の行動パターンに学校への登下校のパターンが確認できず、児童が携帯していないと考えられる子機が 9 台、電池が抜けるなどのトラブルがあったと思われる子機が 1 台、それぞれ確認された。そこで、これら 10 台を除外した残りの 69 台について、損失の原因として考えられるものについて集計した結果を表 4.3 に示す。

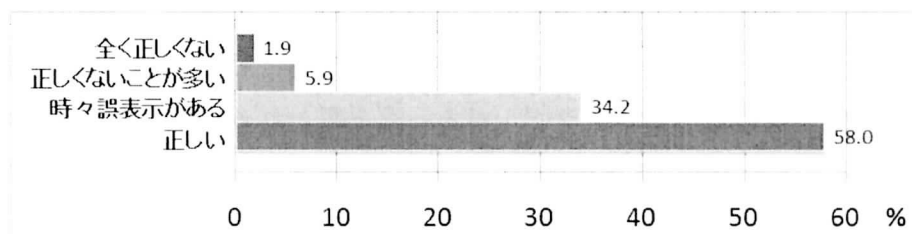
原因 1 については、通学路上など外出していると判断される際のパケットは順調に到達しているが、自宅に戻ったと思われる時点からパケットの損失が目立つケースである。これは、子機をランドセルごとロッカーへ格納する、など自宅における保管状況によるものと思われる。また、原因 2 は、居住エリアから目的地である小学校までの移動にかかる時間から、自動車による移動が考えられるものである。これは、自動車という遮蔽された空間に乗り込むためパケットが損失するものである。このため、本システムの目的を考えた場合、原因 1 及び原因 2 による損失は無視しても差し支えない。

原因 3 及び 4 においては、子機-中継機間の距離的な条件により受信状況が不安定になっているものと考えられる。原因 5 については、中継機アンテナの指向性が、水平方向へ同心円状に広がる特性を持っており、このため傾斜地等で子機との通信可能距離が低下することが原因である。これらは、いずれも中継機の配置状況に起因する問題である。また、原因 1 及び 2 によるものを損失から除外すると、これら原因 3、4 及び 5 が損失の原因として約 9 割を占めるため、中継機を適切に増設することにより、

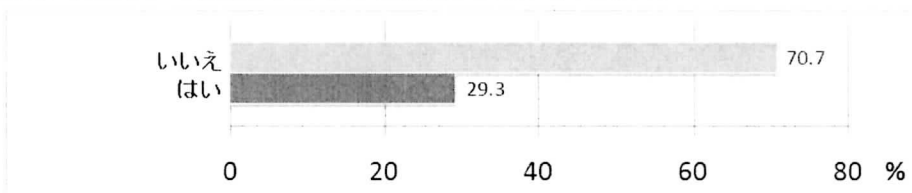
表 4.3. 損失の原因

No	考えられる原因	台数
1	自宅での保管状況	13
2	自動車等での通学	8
3	居住地がサービスエリア周辺部	29
4	居住地に近い中継機が少ない	7
5	居住地周辺が傾斜地	7
6	はっきりとした原因が不明	5

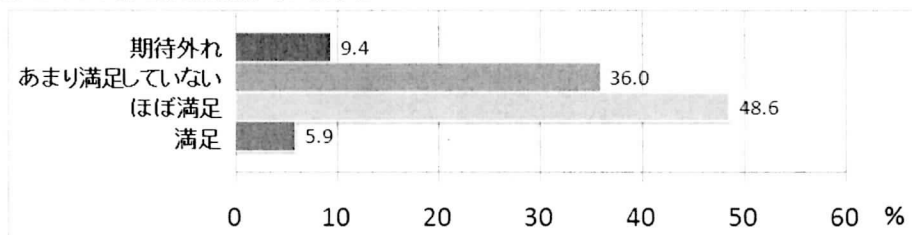
(1) 確認した際の位置情報は、概ね正しい情報が表示されていますか？



(2) 全く見当違いの情報が表示されて混乱したことはありませんか？



(3) このシステムに満足していますか？



(4) このシステムは子どもの安全確保に役立っていると思いますか？

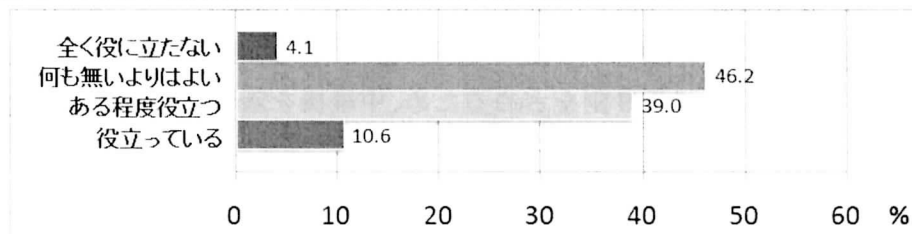


図 4.4. 保護者アンケート結果

パケット損失率を大幅に改善することが可能である。

原因 6 は、ログの解析から損失の原因が推定できなかったものであり、5 台が確認された。これは、今回調査の対象とした全子機 290 台の 1.7%に相当する。これら 5 台の損失率は、それぞれ、5.56%、6.99%、8.86%、16.68%及び 20.65%であり、20%を超える高い損失を示す子機も存在した。損失の原因として、鉄道の高架下を通過す

るなど通学路上の地理的条件に起因するもの、あるいは通学路を著しく外れるなど子供の行動パターンに起因するものなど様々な要因が考えられるが、さらに詳しく調査・分析を行い損失率の低減を図る必要がある。

以上より、使用状況・通学路状況の詳細な調査が必要な例は存在するものの、児童の位置を定期的に把握するという目的をほぼ達成することができたと考えられる。

#### 4-6 損失率の低減における改良プロトコルの効果

本システムの開発当初、塩尻市立西小学校において 30 台の子機により評価実験を行った際、子機台数が少ないにもかかわらずパケット損失が多発し、地域見守りシステムとして十分な性能を得ることが出来なかった。これに対して、現在の運用では 1 校あたり平均して 70 人程度が利用している状況において、子機パケットの損失率は概ね 5%以下に抑制されている。開発当初の評価実験の際に正確な損失率を測定していないため、数値的な比較を行うことは出来ないが、改良プロトコルを導入した本地域見守りシステムの子機パケット損失率が、システムの目標とする 5%以下に抑制されていることを考慮すると、改良プロトコルによるパケット損失率抑制の効果は明らかであると考えられる。

#### 4-7 アンケート調査

実際にシステムを利用している児童の保護者 492 人に対して、2011 年 2 月にアンケート調査を行った（回収率は 68.3%、336 人）。この結果を図 4.4 に示す。これをもとに、利用者から見た本システムに対する評価について分析を行う。

##### 4-7-1 位置情報の正確性

位置情報の信頼性を確認するため行った「Q1 確認した位置情報は、概ね正しい情報が表示されていますか」という質問に対して、「正しい」と感じている保護者は 269 回答中 156 人(58.0%)であった。これは、「正しくないことが多い」及び「全く正しくない」と回答した 21 人(7.8%)を大きく上回り、児童の位置については概ね正しい情報が提供されていることがわかる。しかし、「時々誤表示がある」とする保護者が 92 人(34.2%)存在しており、さらに「Q2 全く見当違いの情報が表示されて混乱したことが

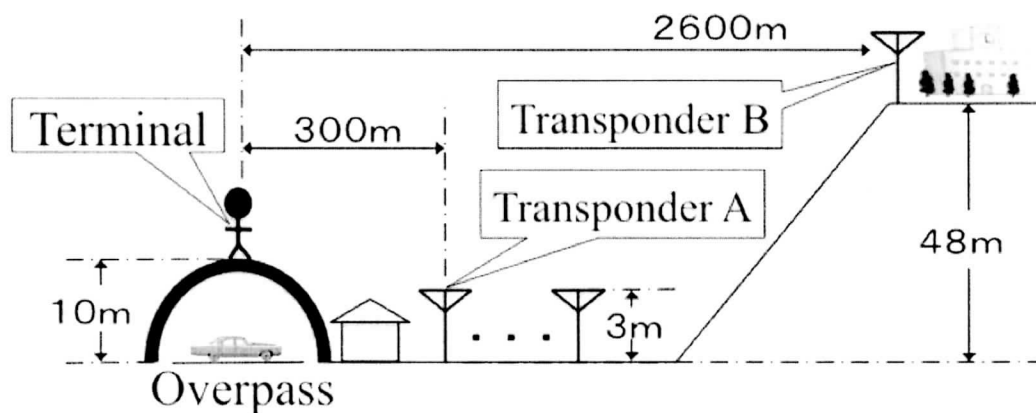


図 4.5. 誤表示が発生する代表例

ありましたか？」という質問に対しては、266 回答中 78 人(29.3%)があると回答している。自由記述の意見を分析すると、ある特定の区域で全く見当違いの位置を示す事例が比較的多く指摘されており、これが誤表示さらに保護者を混乱させる原因となっている。ただし、この質問における位置情報の正確性に関しては、回答者の主観に基づくものであり、具体的な数値を示して正確性の評価を依頼したものではない。

誤表示が多く発生する代表的な例を図 4.5 に示す。国道にかかる陸橋上でパケットが発信された場合、最も近隣にある中継機 A での受信電界強度を、はるか遠方にある中継機 B の受信電界強度が上回ってしまうことにより、実際の位置とはかなり離れた場所と認識されてしまう。このように、高さ方向に変化の多い地形において、誤表示が発生しやすいことが確認されている。

#### 4-7-2 満足度

システムに対する満足度を「Q3 このシステムに満足していますか」という質問で調べた。「満足している」「ほぼ満足」という肯定的回答があわせて 286 回答中 156 人(54.5%)であった。ただ、このシステムの利用料は無料となっているため、満足の理由として、携帯電話などの高額なサービスを児童に持たせなくても気軽に利用出来ることを 17 人が挙げている。今回の評価は、サービスの利用料に関しての満足度を評価するものではないため、この 17 人を肯定的回答から差し引くと 139 人(48.6%)

となるが、ほぼ半数の保護者が満足して使っていることがわかる。満足している理由としては、登下校時の児童のおおまかな状態が把握できることが最も多く挙げられている。一方、満足できない理由としては、「子機がランドセルに収まらない・大きすぎて子どもが持つことを嫌がる」、「子機の形状を子どもが喜ぶような物にしてほしい」、「子機がすぐ壊れた」など、子機の大きさ、デザイン及び耐久性に関するものが大半を占めている。

位置情報に関する不満については、やはり GPS などを利用するシステムに比べて位置精度が低いことを挙げる声が多い。位置推定の精度に関しては、保護者に対するシステム説明会の際、本システムにおける位置推定方法を解説し、本システムは GPS のような高精度の位置情報を提供するものではないことを説明している。しかし、十分な理解が得られず、GPS と同等の精度が得られるといった誤解が生じていることがアンケートの自由記述から伺える。今後、この点について十分な説明を適切に行い、システムの特性を理解した上で利用してもらうためのさらなる努力が必要である。

#### 4-7-3 児童の安全に対する評価

保護者の実感としての安全に対する効果について、「Q4 このシステムは子どもの安全確保に役立っていると思いますか？」の質問で調べた。「役立っている」「ある程度役立っている」の肯定的意見を合わせると、292 回答中 145 人(49.7%)が効果を感じている。しかし、安全確保という観点においては現状の位置精度では不安とする傾向が見られる。また、「何も無いよりは良い」という消極的な肯定意見が 135 人(46.2%)を占めるが、これは見守りシステムがこの地域で稼働しているという事実が犯罪の抑止力となるという側面は評価する、という傾向によるものである。

#### 4-7-4 アンケート全体の評価

これら各質問項目の結果から、半数程度の利用者はシステムの機能と有効性について満足しており、地域見守りシステムとして概ね有効に機能していることが示された。しかし、位置特定の精度の点で不満を持つ利用者が多く、この点についてさらなる改良が必要であることが確認された。

本システムの位置推定は、4-1 で述べたとおり子機パケットを受信した中継機の位置とその受信電界強度のみで行っている。このため、ビルの多い市街地内に対して畑の中や橋の上など、見通しの違いにより子機パケットの受信状況は変化するので、位

位置推定が難しいエリアが存在する。特に、4-6-1 で述べたように陸橋の上など一時的な見通しの変化により、近隣の中継機よりも遠くの中継機の受信電界強度が上昇し、極端な誤差が発生するケースが確認されている。

このように位置精度の問題は、エリアの建造物や地形などの状況を詳細に検討し、中継機の増設・配置の最適化をすすめることで十分改善することが可能である。

#### 4-8 結言

本章では、長野県塩尻市に構築した地域見守りシステムについて、実際の稼働状態におけるパケット損失率の調査を実施し地域見守りシステムとしての性能評価を行った。また、システムを利用している児童の保護者に対してアンケート調査を実施し、利用者の立場からのシステムに対する評価と要望について分析を行った。その結果、下記の2点を確認した。

- (1) 地域見守りシステムの評価は、通信路におけるパケットの損失だけでは不十分であり、児童が子機を実際に利用している状況下でどの程度のパケット損失が発生しているのか評価する必要がある。そこで、子機が発信したパケットがどの程度損失しているのかを、サーバが受信した子機パケットのログデータから算出し、評価を行った。その結果、72.8%の子機のパケット損失率が5%以下であることが確認された。さらに、損失率が高い子機については、中継機のエリアの問題であることが確認された。
- (2) 本システムを利用している児童の保護者に対してアンケート調査を実施した。その結果、50%の利用者がシステムに満足しており、さらに、71.6%の利用者がその効果を実感していることが確認できた。しかし、位置精度に関して不満が多く、この点に関する改良の必要性も確認された。

また、本章の評価から明らかになった本システムにおける特筆すべき特徴を、下記に2点示す。

- (1) 本地域見守りシステムでは、1200bps という低速な回線を用いて300名を超える児童の位置推定を可能としている。高速・大容量な通信設備を必要としない本シ

システムは、比較的安価に構築することが可能であり、また保守にかかる費用も抑えることができる。今後、他の市町村など多くの地域へ本システムの構築・利用が広がり、安心・安全な地域づくりが行われることが期待される。

- (2) また、地域見守りシステムは、児童の位置確認が可能であることから、利用者に安心を提供するシステムであるが、このようなシステムが地域で稼働している事による犯罪の抑止効果も大きい。これは、地域の安全に貢献するものである。

今後は、アンケートでも浮き彫りとなった位置推定の精度向上を図るべく、中継機の増設及び配置の見直し等を推進する。さらに、周辺中継機の受信電界強度情報も利用した、より詳細な位置の推定が可能な手法についても開発を行い、より良い地域見守りシステムへと発展させる予定である。

## 第5章

### センサネットワーク端末の小型化と 省電力化に関する提案と評価



## 第 5 章

# センサネットワーク端末の小型化と 省電力化に関する提案と評価

### 5-1 緒言

いつでも、どこでも、どんなものでも容易にコミュニケーションが可能となるユビキタスネットワークの実現において、小型の無線通信装置を内蔵した多数のセンサを相互に接続させるセンサネットワークが注目されている。センサネットワークの研究においては、SmartDust[1]がその先駆けとして良く知られており、現在では医療・福祉、防犯・セキュリティ、防災、農業などの幅広い分野における応用を目的とした研究が盛んに行われ、製品として販売される事例も増えつつある。特に、老人や病人の安否見守りシステムや、自然環境・災害現場などのモニタリングについて応用が進みつつある。

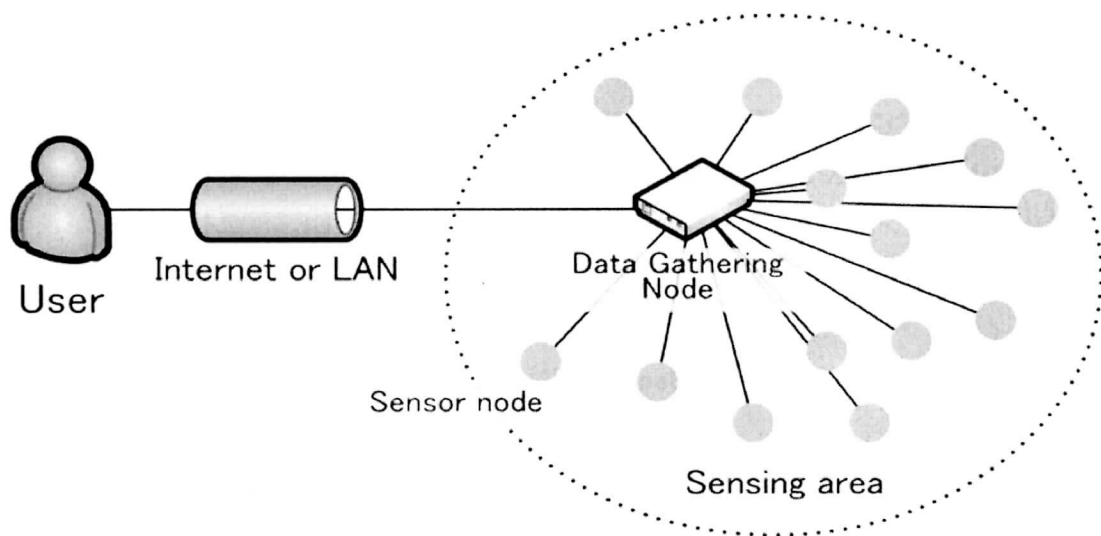


図 5.1. システム概要

センサネットワークの構成を図 5.1 に示す。独立した多数の端末(Sensor node)が自律的に通信を行い、センシングした情報を定期的にデータ収集装置(Data Gathering Node)に送信する。このように、センサネットワークの端末は、人間などの移動体や、自然環境から情報を収集することを目的としているため、サイズが小さいことが求められる。また、容易に電源が確保できない環境での利用が想定されるため省電力であることが求められる。

センサネットワーク端末の省電力化については、無線デバイスの受信待機時間の電力消費を抑えるため、効率良くスリープ状態をとる S-MAC が Wei Ye らにより提案されている[2]。端末の状態を Active と Sleep の 2 つに分け、Active の状態である場合のみ通信が可能であるとする手法である。この提案では、通信のためすべての端末が同時に Active になる必要があるが、Active であることを近傍ノードへブロードキャストすることにより同期をとっている。また、Active な状態の期間をダイナミックに変更することで、より省電力性能を高めるなど、S-MAC から派生した研究は数多い[3][4][5]。また、Active となるタイミングを電波時計などの正確な時計で同期させることにより、受信タイミングをスケジューリングして省電力化を図る手法も提案されている[6]。

同期を行わない方式としては、Low Power Listing(LPL)と呼ばれる手法が一般的である。センサノードは一定間隔  $T$  で短期間 Active 状態になり送信チャンネルをチェックする。この時、チャンネルが使用中だった場合のみ Active 状態を継続し、パケットの受信を行う。一方、送信ノードは  $T$  よりも長いプリアンプルを送信することにより、他のノードに対して送信の要求があることを通知する。LPL をベースとした手法では、B-MAC[7]、X-MAC[8]及び TICER[9]などがよく知られている。

最近では、センサーネットのプロトコルとして ZigBee(IEEE802.15.4)[10]が注目され、無線モジュールとして製品化も行われている。ZigBee では、ノードを ZigBee コーディネータ、ZigBee ルータ及び ZigBee エンドポイントの 3 つに分類している。このうち、中継を行わない ZigBee エンドポイントに関してのみ省電力な仕様となっている。

このように、現在提案されているセンサーネットのプロトコルは、いずれもセンサネットワーク端末が受信機能を有することを前提に、受信回路に供給される電力を効率的に抑制することで省電力化を図るものである。

我々は、更なる省電力化と小型化を進めるため、図 5.2 に示すような受信回路を省

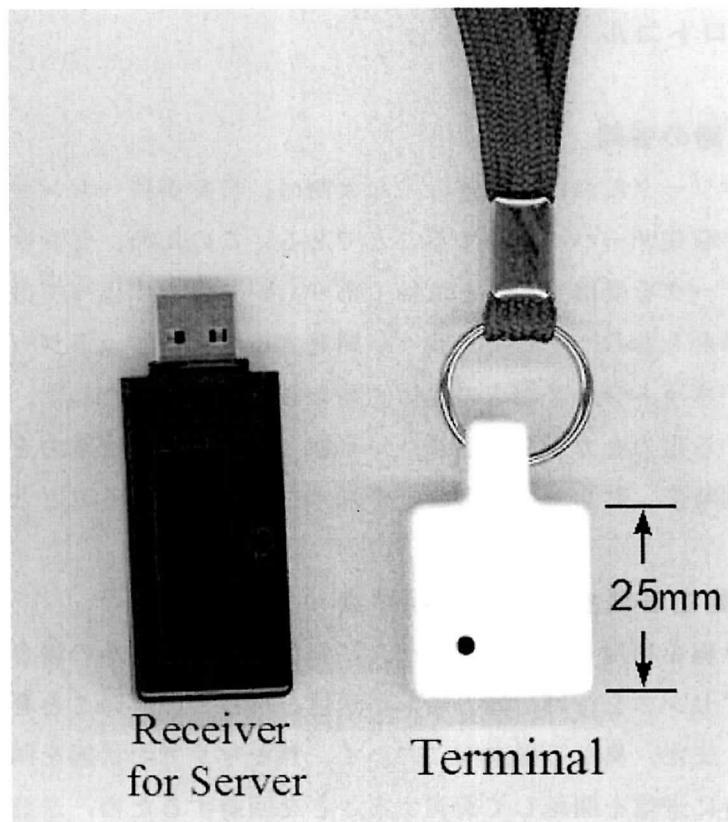


図 5.2. センサーネット端末 (右) と受信機 (左)

略した端末を開発し、さらにこれを用いたセンサネットワークを提案する。しかし、センサネットワーク端末が受信機能を持たないため、従来のようなキャリアセンスを用いたプロトコルを利用することはできない。このため、コリジョンによるパケット損失が増大し、システム全体の性能に大きな問題が生ずることとなる。

そこで、この問題を解決するため、受信回路を持たないセンサネットワーク端末を用いたセンサネットワークにおける新たなプロトコルを提案する。このプロトコルは送信開始前にランダムな待ち時間を設ける事と、1パケット中に過去データを重複して送信する事の2つから成る。

本研究では、シミュレーションによりこの提案プロトコルについての詳細な考察を行う。さらに、提案プロトコルを受信機能を持たない実際のセンサネットワーク端末に実装し、複数の端末が同時に動作する環境化においてデータの損失率について実験を行い、提案手法の有効性を確認する。

## 5-2 提案プロトコル

### 5-2-1 受信回路の省略

センサネットワークにおける端末の主な役割は、自身が持つセンサにより測定したデータをデータ収集サーバへ送信することである。このため、センサネットワーク端末が何らかのデータを受信することは稀であり、システムによってはデータを受信することがない場合もある。そこで、我々が開発するセンサネットワークシステムにおいては、センサネットワーク端末の受信回路を省略することとした。これにより、受信回路が消費する電力をカットすることが可能となり大幅な省電力を実現することが可能となる。同時に、センサネットワーク端末を小型化出来ることとなる。

### 5-2-2 受信回路を省略することの問題点

一般的に、無線を利用したネットワークにおけるプロトコルの場合、送信を開始する前にキャリアセンスを行い、他の端末が送信を行っていないことを確認してから送信を開始する。また、異なる端末間において、無キャリアの状態を同時に検出することにより、同時に送信を開始して衝突することを回避するため、送信開始までランダムな待ち時間を設けることなどが一般的に行われている。しかし、本システムで利用するセンサーネットワーク端末は、低消費電力の実現のため受信機能を省略しているので、キャリアセンスを行うことができない。このため、自身以外の他端末が現在どのような状態にあるのか確認する手段がなく、一方的に送信を実行する他ない。結果、システムの全端末が無秩序に送信を繰り返すことになり、送信の衝突が多発してシステム全体のスループットを著しく低下させることとなる。

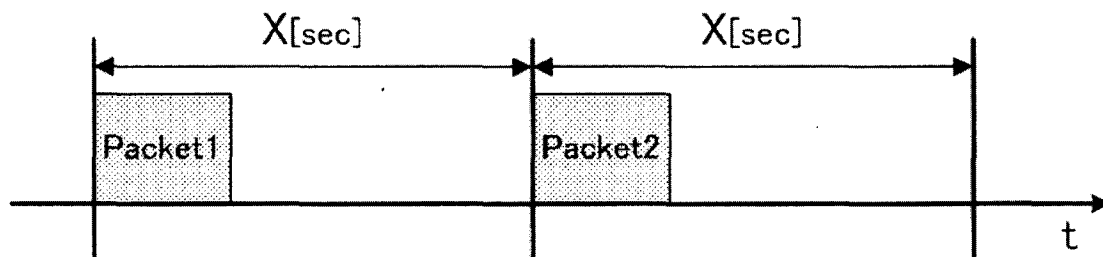


図 5.3. パケットの送信タイミング

### (1) 常時衝突端末の発生

本システムのセンサーネット端末は、図 5.3 に示すように一定時間間隔  $X[\text{sec}]$  毎に 1 回パケットを送信する。初回の送信開始は、端末の電源が投入されたタイミングによってのみ決まるため、他の端末や時刻などとはまったく無関係に非同期に行われる。このため、初回の送信タイミングが偶然一致してしまった端末が複数存在する場合、それらの送信は毎回必ず衝突することとなり、送信がいつまでも完了しない端末が多数発生してしまう。

### (2) データ到達が未確認

一般的なプロトコルの場合、送信が確実に行われた際には、受信側が送信側に対して ACK を送出し、送信側がこれを受信することにより通信が確実に行われたことを双方が認識する。しかし、本システムの場合、端末は受信機能を持たないため ACK を受信することが出来ず、端末は自身の送信が確実に行われたか確認する方法を持たない。このため、端末数の増加などによりパケットの損失が多発した場合、システム全体として通信の品質が著しく損なわれることになる。

### 5-2-3 提案プロトコル

受信機能を省略しているためキャリアセンスを行うことができない端末を使用する本システムにおいて、前述した常に衝突する端末の発生を回避し、確実な送信を確保するための新たなプロトコルを提案する。

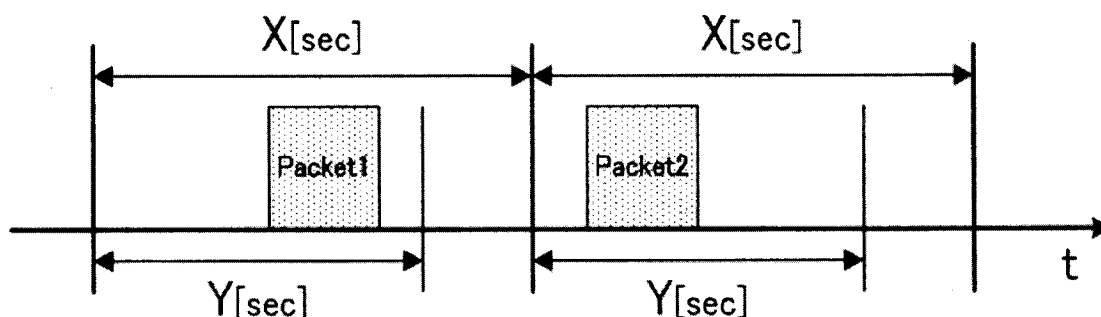


図 5.4. ランダム遅延時間を設定した場合のパケット送信タイミング

### (1) ランダム遅延時間の設定

端末は、一定時間間隔  $X[\text{sec}]$  毎に一回送信を行う。このため 5-2-2 で述べたとおり、同じタイミングで送信を開始した端末は、以降常に衝突を繰り返し送信が完了しない。そこで、図 5.4 に示すように送信を開始する前に  $0 \sim Y \text{ sec}$  のランダムな送信遅延時間  $T$  ( $0 \leq T \leq Y$ ) を設ける。これにより送信のタイミングは、送信を試みる毎に最大  $Y$  の範囲で変化することとなり、同時に送信を開始したことにより常に送信が衝突する端末の発生を回避することが可能となる。この場合でも、パケットの送信に要する時間を  $P$  とした時、 $Y$  を  $X > Y + P$  の範囲で設定することにより、時間  $X$  に 1 回の送信は保障されることとなる。

### (2) 過去データの重複送信

端末は受信側からの ACK を受信することが出来ないので、自身が送信したパケッ

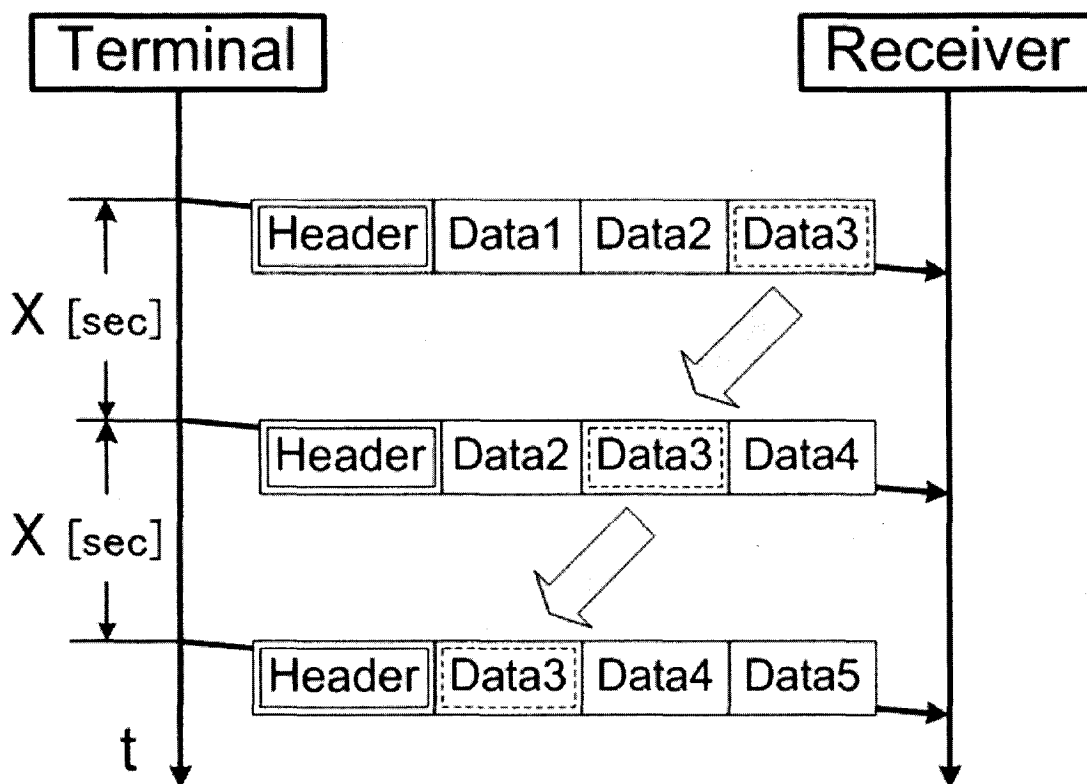


図 5.5. パケットの重複送信

トが正しく収集サーバで受信されたかどうかを確認することが出来ない。このため、他端末との衝突などにより送信が完了しなかった場合、その際に送信しようとしたデータは失われてしまうことになる。つまり、パケット損失による影響は非常に大きなものとなる。そこで、1回の送信でデータの転送が完了しなかった場合に対応するため、図 5.5 に示すように送信パケット中に現時点で送信を行う最新データに加え過去  $Z-1$  回分のデータを付加し、合計  $Z$  回分のデータを 1 つのパケットに收容して送信を行う。これにより、連続して送信に失敗する事象が  $Z$  回より少ない場合は受信側にデータが到達することとなり、送信の信頼性が向上することとなる。しかし、この提案は 100%の到達率を保証せず、また最大で  $X*(Z-1)$  の遅延時間が発生する可能性がある。したがって、この提案の利用は、 $X$  が比較的短いという条件下で、この損失と遅延時間を許容出来るアプリケーションにおける利用に限定される。さらに、 $Z$  を大きくするとパケット長が長くなり、パケットの衝突確率が大きくなる事に対する考慮が必要である。

### 5-3 評価

#### 5-3-1 仕様

評価を行う対象としての本システムの仕様を述べる。使用周波数は 315MHz 帯を使用し、通信速度は 60kbps である。端末のハードウェア構成におけるブロック図を図 5.6 に示す。端末が送信するパケットの構成は図 5.7 に示すとおりであり、プリアンブル、端末 ID、データ部及びチェックサムから構成されている。データ部には、提案プロトコルにおける重複送信を実現するため、最新データに加え複数の過去データが含まれる。

#### 5-3-2 シミュレーションによるデータ損失率の評価

一定時間間隔  $X$  毎に発生するデータのうち、データ収集装置が正しく受信出来ないデータの割合をデータ損失率と呼ぶ。提案プロトコルにおけるデータ損失率をシミュレーションにより求めた。シミュレーション対象のシステムとしては、図 5.1 の構成で端末が 100 台、それぞれの端末の送信繰り返し時間  $X$  は 1sec として 100 パケット送出するものとし、全体として高負荷な状態とする。また、各端末の起動のタイミングはランダムに行われるものとする。このシステムにおいて、 $Z$  を 1 から 9 まで 2 ず

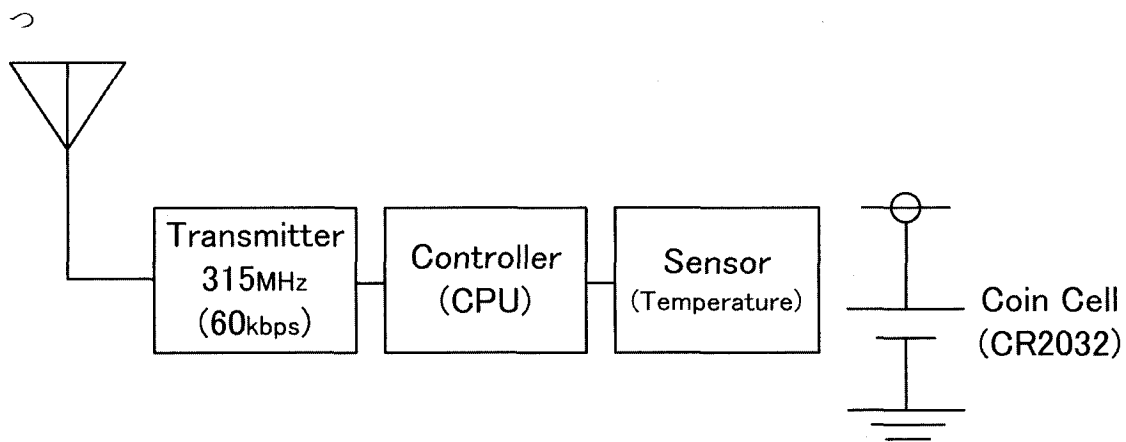


図 5.6. センサ端末のブロック図

Preamble	WS	Terminal ID	Data1	...	DataZ	Check sum
48bit	32bit	32bit	16 × Z bit			8bit

WS : Frame synchronize

Data : Measurement data

図 5.7. パケット構成

つ増加, さらに Y を 100msec から 900msec まで 200msec ずつ増加させ, それぞれの条件において各 5 回のシミュレーションを行った. この結果データ損失率の平均値を図 5.8, 最大値を図 5.9 に示す. 両図とも横軸は Y の値を, 縦軸はデータ損失率を示す.

図 5.8 の平均値は, 5 回のシミュレーションにおける全端末の損失率の平均値を求めたものであり, 95% の信頼区間もグラフ中に示している.

図 5.9 は損失率の最大値の結果を示している. 損失率の最大値を評価の対象とする理由は次の通りである.

今回のシステムでは, 各端末において電源が投入されたタイミングに従い, 送信タイミングが決められる. このため, Y の値が 0 の時には常に送信パケットが衝突して損失する端末群ができる. また Y の値を設けても, その値によってはタイミングには



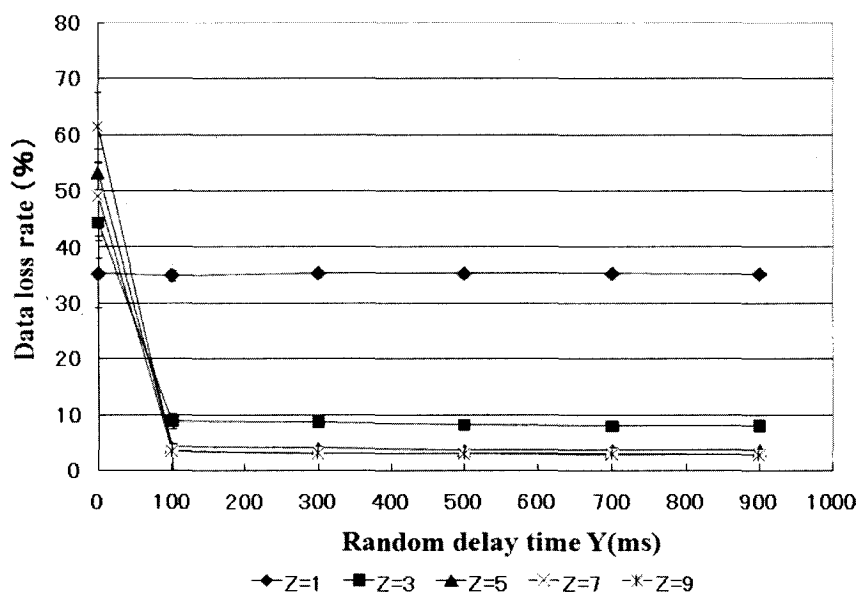


図 5.8. データ損失率の平均値

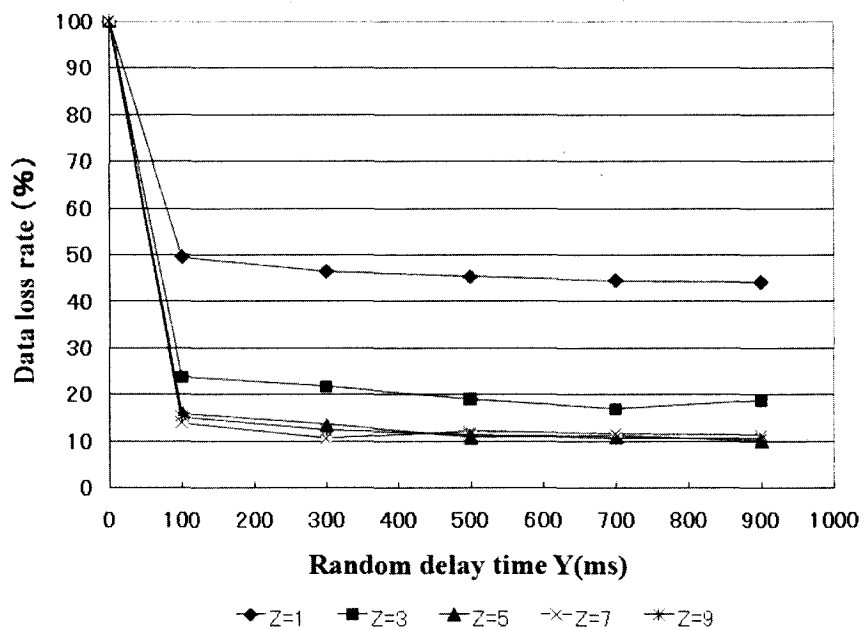


図 5.9. データ損失率の最大値

バラツキがあり、データ損失率に偏りが出ることが想定される。このため、ある条件下において、データ損失率の平均値が例えば 3%のときにアプリケーション上許容範囲であったとしても、特定の端末群においてはデータ損失率が 30%となり問題が生じることも考えられる。このように、端末間でデータ損失率に偏りが生じる可能性がある本システムのケースでは、データ損失率の平均値のみを用いてプロトコルの性能を論じることには問題があると考え、平均値とともに最大値も評価の対象とすることとした。

なお、ここでデータ損失率の最大値を求めるに際しては、同じ条件で電源投入タイミングをランダムに変化させたシミュレーションを 5 回行い、各回のシミュレーションにおける損失が最大である端末のデータ損失率を求め、その値の 5 回の平均を最大値とした。

#### (1) ランダム遅延時間 Y の導入

まずランダム遅延時間 Y の導入の効果について検証する。データ損失率の平均値及び最大値ともに、導入による大幅な改善が見られる。ランダム遅延時間を設けない場合、平均値では 30%以上の損失率となり、最大値では常時衝突端末の発生により損失率が 100%となってしまう。これに対しランダム遅延時間を導入することにより、平均値では Z が 2 以上の場合で損失率が 10%以下となっている。

Z が 1 のとき、平均値においてランダム遅延時間 Y の導入の効果がほとんど見られないが、これは元々起動のタイミングのみによって決まるランダムな送信タイミングに、ランダムな遅延時間を追加しているだけであり送信タイミングに有意な差が現れないためである。しかし、最大値においては Z=1 の場合は 50%以下、Z が 2 以上の場合でも 25%以下となり、いずれも Y の導入による効果が認められる。Y の導入により常時衝突端末が解消されたことが主な要因である。

また、Y の増加に対する損失率の変化を見ると、平均値ではほとんど変化が見られないが、最大値ではわずかながら減少が認められ、Y=900msec のときに損失率が最小となっている。

#### (2) 過去データの重複送信 Z の導入

次に、過去データの重複送信 Z の導入の効果について検証する。Y を導入した場合について平均値で比較すると、図 5.8 において Z を導入しない場合 (Z=1) で 35%

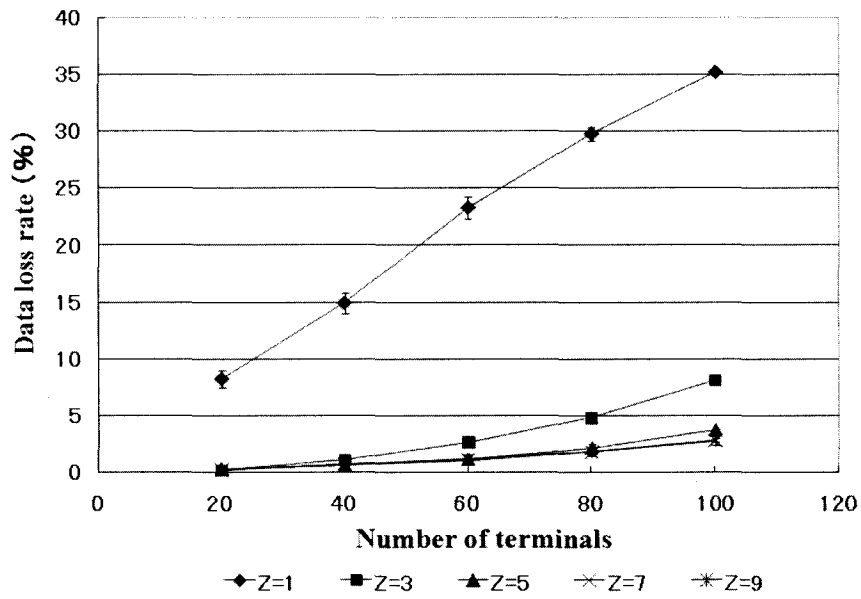


図 5.10. 端末台数によるデータ損失率の平均値の変化 (Y=900msec)

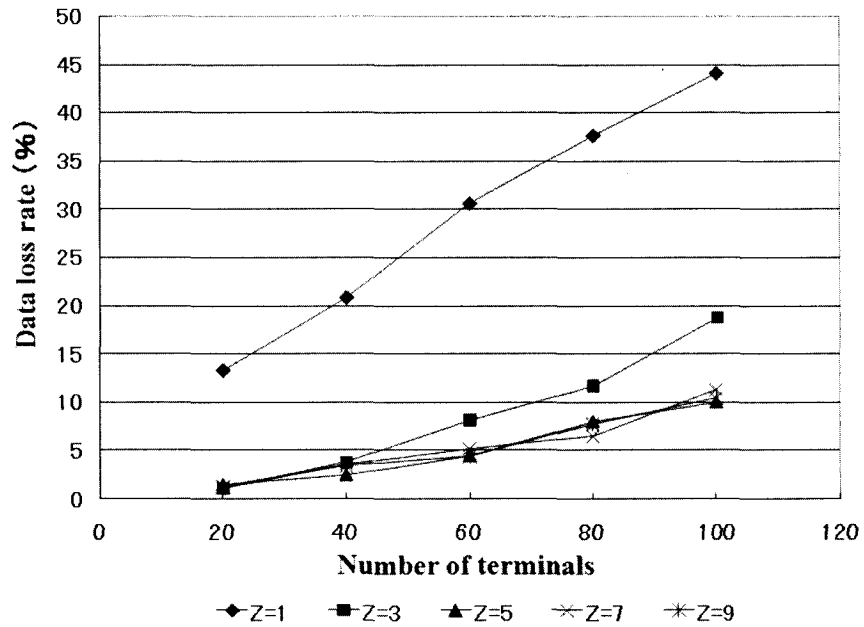


図 5.11. 端末台数によるデータ損失率の最大値の変化 (Y=900msec)

程度であったものが、 $Z=3$  で 9%程度、 $Z=5$  で 4%程度、また  $Z=7$  で 3%程度まで改善している。最大値でも、図 5.9 において  $Z$  を導入しない場合 ( $Z=1$ ) で 45%程度であったものが、 $Z=3$  で 20%程度、 $Z=5$  で 13%程度、また  $Z=7$  で 10%程度まで改善している。

平均値及び最大値のいずれも、 $Z$  の導入により損失率が大幅に改善していることが認められ、 $Z$  が大きくなるにつれて損失率は減少する。しかし、 $Z$  が 5 以上の場合、 $Z$  を大きくしてもその改善の幅はわずかとなる。これは、 $Z$  を大きくすることによりパケットが連続して損失してもリカバーできる一方で、 $Z$  の増加にともないパケット長が長くなり、衝突の確率が上昇してしまうためと考えられる。

### (3) 端末台数による評価

(1)において  $Y$  の導入による効果を検証したが、 $Y=900\text{msec}$  の時に損失率の最大値において効果が最大になることが確認された。そこで、この条件下で、端末の台数を 20 台から 100 台まで変化させた場合の損失率の変化をシミュレーションにより求めたのが、図 5.10 と図 5.11 である。図は横軸を端末台数、縦軸をデータ損失率としている。 $Z$  を 5 以上に設定した場合、60 台まで平均値及び最大値ともに損失率が 5%以下に抑えられていることが確認できる。この程度の損失率であれば、アプリケーションを選べば十分に実用に足るものであると考えられる。

### (4) ACK とキャリアセンスが導入されたプロトコルとの比較

提案プロトコルによる効果と比較するため、ACK とキャリアセンスを導入した場合のデータ損失率の平均値をシミュレーションにより求めた。シミュレーションにおいて、キャリアセンス後のランダム遅延時間の最大値は 10msec、パケットの再送回数は 7 回とした。この結果を図 5.12 と図 5.13 に示す。また、その 95%信頼区間についてもグラフ中に示す。図 5.12 では、 $Z$  が導入されていない ( $Z=1$ ) 場合、図 5.13 では  $Z=5$  の場合について示す。ACK とキャリアセンスを導入した場合には、隠れ端末の存在を考慮し、隠れ端末の台数が 0%、10%及び 30%の結果についてそれぞれ示す。隠れ端末とは、他のすべての端末からのキャリアが届かない端末である。同様に、隠れ端末からのキャリアは他の端末へ到達しない。

隠れ端末が 0%の時、ACK とキャリアセンスを導入したプロトコルのデータ損失率は、 $Z=1$  と  $Z=5$  の両方の場合において 1%以下となっている。しかし、隠れ端末が存在する場合、端末の台数が 40 台を超えるとその損失率は増加する。一方、提案プ

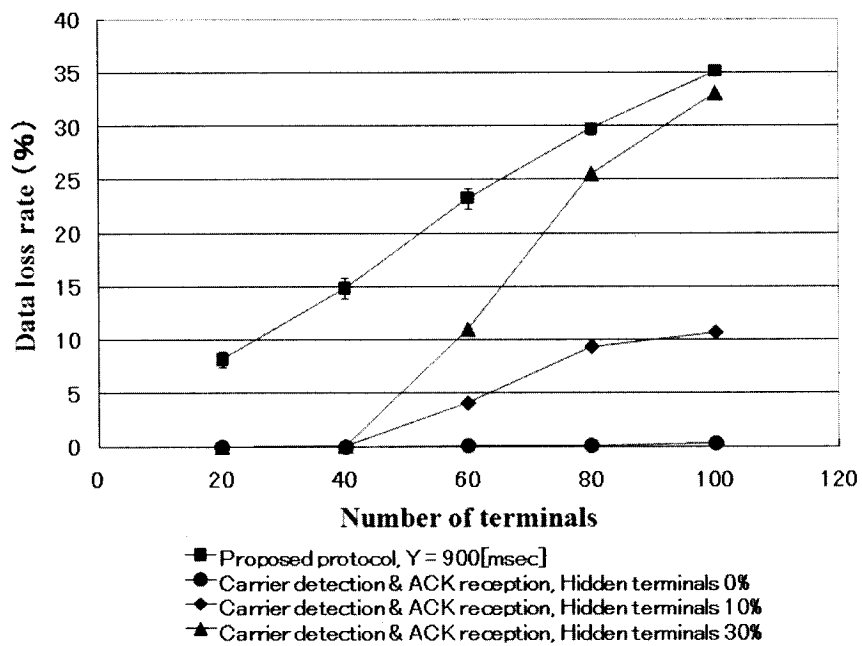


図 5.12. データ損失率の平均値 (Z=1)

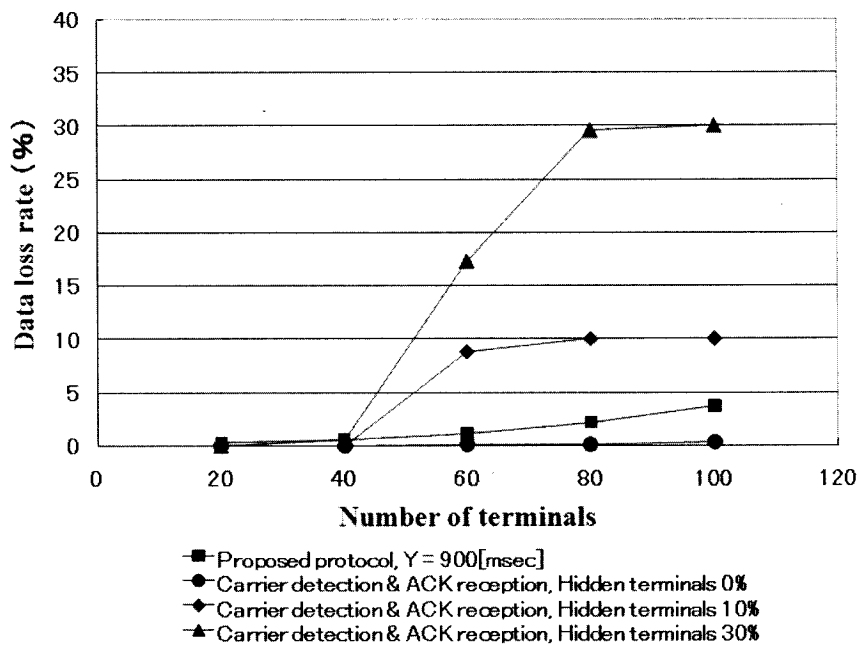


図 5.13. データ損失率の平均値 (Z=5)

プロトコルのデータ損失率は、 $Z=1$  の時には ACK とキャリアセンスを導入したプロトコルのデータ損失率を大きく上回っている。しかし、 $Z=5$  の時、提案プロトコルのデータ損失率は 5%以下となる。この値は、隠れ端末が存在する場合の ACK とキャリアセンスを導入したプロトコルのデータ損失率よりも低い。その理由は、互いにキャリアが検知できない隠れ端末においては、キャリアセンス機能の意味が無くなるためである。さらに、端末台数の増加に対して、損失率の上昇が緩やかである。このことから、隠れ端末が存在し端末数が比較的多い場合に、提案プロトコルが有効であることが確認された。

パケット長についても検討する必要がある。データ長の増加はネットワークの負荷を高めることにつながり、全てのプロトコルに不利となる。温度など、一般的にセンサネットワークで扱われるデータを送信するためには、現在のパケット長で十分である。このため、データ長が  $16 \cdot Z$  bit を超える送信については検討を行っていない。この点に関しては、今後の検討課題である。

### 5-3-3 実機を用いた評価

提案手法を、図 5.3 で示した実際のセンサーネット端末に実装し実験を行った。しかし、実験のために準備出来るセンサーネット端末の台数が 25 台に制限されたため、5-3-2 で示したシミュレーションと同じ傾向を再現するためには、ネットワークの負荷を高める必要がある。そこで、シミュレーションにおいて 1sec としていたセンサーネット端末の送信間隔  $X$  を 200msec として実験を行った。端末数を 10 台として、 $Y$  がそれぞれ 20msec, 100msec 及び 180msec,  $Z$  が 1,3 及び 5 の場合において、損失率の平均値を求めた結果が図 5.14, 図 5.15, 図 5.16, 最大値を求めたのが図 5.17, 図 5.18, 図 5.19 である。また、端末数を 25 台として同様に損失率の平均値を求めた結果が図 5.20, 図 5.21, 図 5.22, 最大値を求めたのが図 5.23, 図 5.24, 図 5.25 である。さらに、それぞれ比較のために、同じ条件において 5-3-2 と同様のシミュレーションを行い、その平均値及び最大値についてそれぞれ併せて記載した。各結果の 95 % 信頼区間についても、グラフ中の各記号上にその範囲を示した。

端末数が 10 台の場合と 25 台の場合を比較すると、端末数の増加に伴い、平均値及び最大値ともにデータ損失率が増加していることが認められる。このため、端末数の増加により、ネットワーク全体の性能が低下することが、実機による実験によっても確認された。

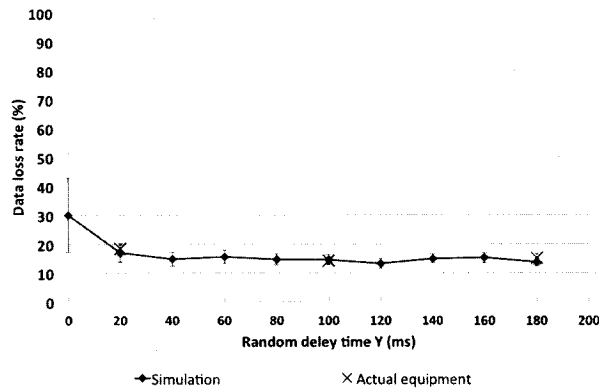


図 5.14. データ損失率の平均値（端末台数 10 台，送信間隔  $X=200\text{msec}$ ， $Z=1$ ）

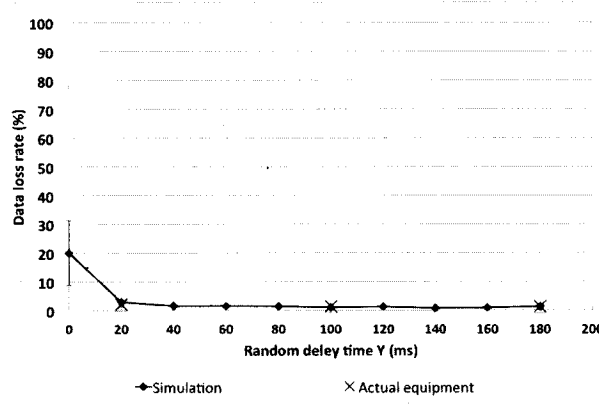


図 5.15. データ損失率の平均値（端末台数 10 台，送信間隔  $X=200\text{msec}$ ， $Z=3$ ）

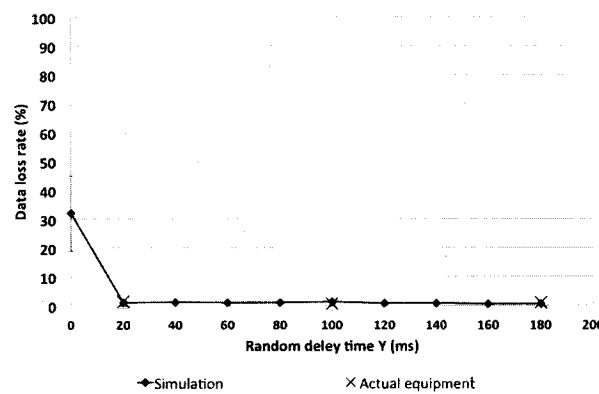


図 5.16. データ損失率の平均値（端末台数 10 台，送信間隔  $X=200\text{msec}$ ， $Z=5$ ）

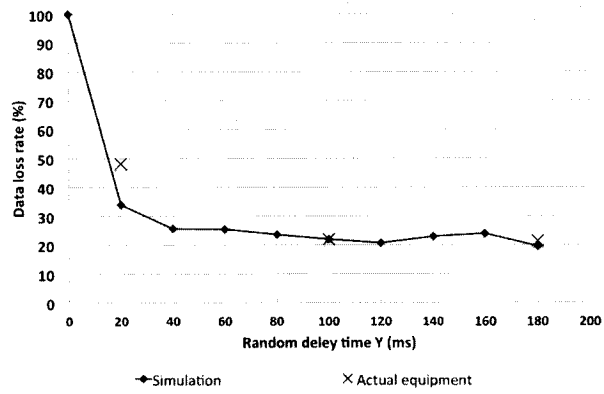


図 5.17. データ損失率の最大値 (端末台数 10 台, 送信間隔  $X=200\text{msec}$ ,  $Z=1$ )

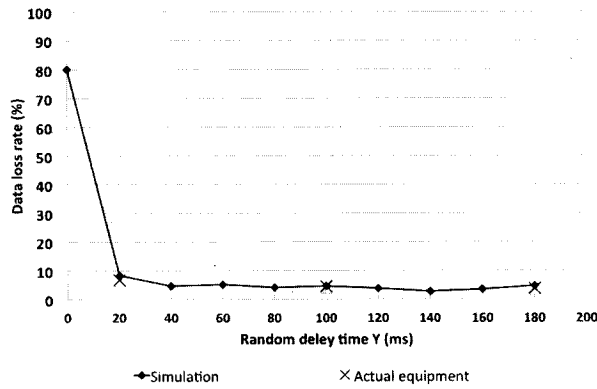


図 5.18. データ損失率の最大値 (端末台数 10 台, 送信間隔  $X=200\text{msec}$ ,  $Z=3$ )

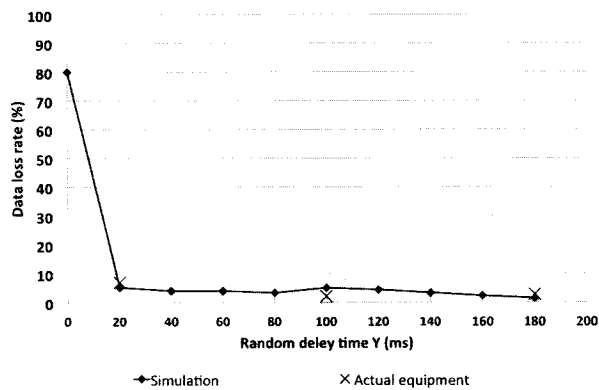


図 5.19. データ損失率の最大値 (端末台数 10 台, 送信間隔  $X=200\text{msec}$ ,  $Z=5$ )



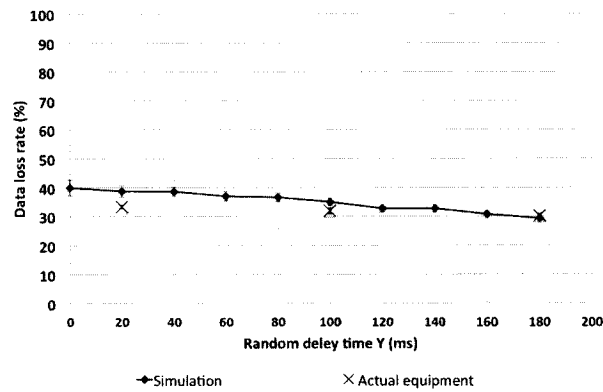


図 5.20. データ損失率の平均値 (端末台数 25 台, 送信間隔  $X=200\text{msec}$ ,  $Z=1$ )

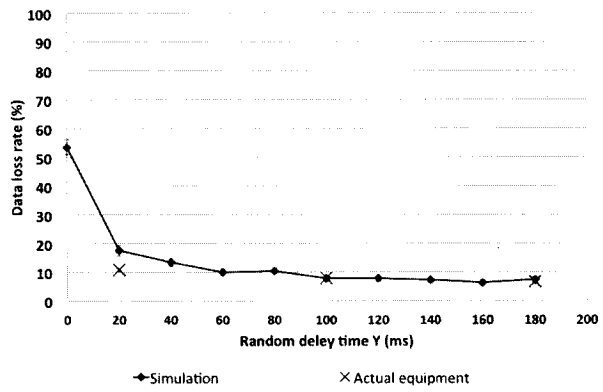


図 5.21. データ損失率の平均値 (端末台数 25 台, 送信間隔  $X=200\text{msec}$ ,  $Z=3$ )

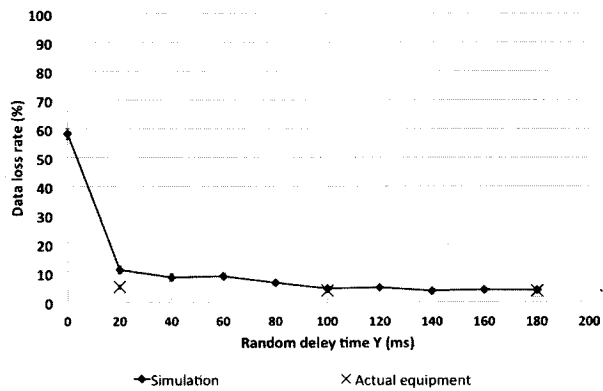


図 5.22. データ損失率の平均値 (端末台数 25 台, 送信間隔  $X=200\text{msec}$ ,  $Z=5$ )

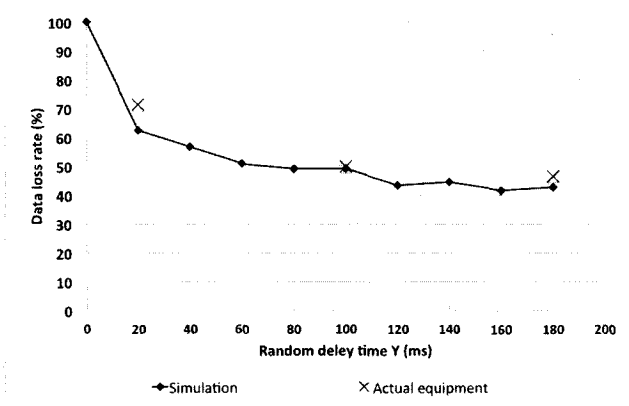


図 5.23. データ損失率の最大値 (端末台数 25 台, 送信間隔 X=200msec, Z=1)

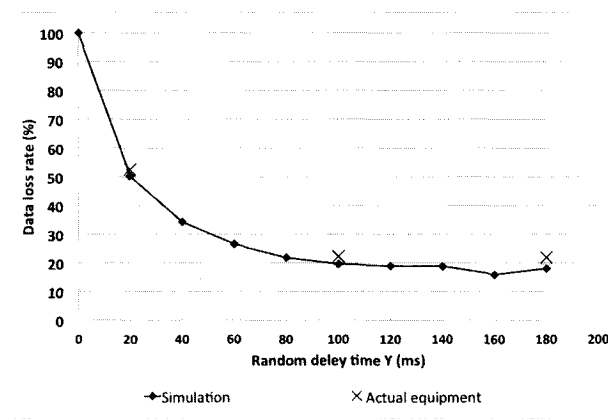


図 5.24. データ損失率の最大値 (端末台数 25 台, 送信間隔 X=200msec, Z=3)



図 5.25. データ損失率の最大値 (端末台数 25 台, 送信間隔 X=200msec, Z=5)

25 台の時の実験結果におけるデータ損失率の平均値において、Y を 20msec から 180msec へ増加させると、Z=3 の場合で 11% から 6.7%、Z=5 の場合で 5.4% から 4.0% と、データ損失に関して改善が認められる。また、Z を 1 から 5 へ増加させると、Y = 180msec の場合で 30.2% から 4.0% へと大幅に減少しており、Z の導入による著しい効果が認められる。最大値についても、Y を 20msec から 180msec へ増加させることにより、Z=3 の場合で 52.6% から 21.8%、Z=5 の場合では 48.1% から 11.9% とデータ損失率が大きく減少しており、常時衝突端末の発生を効果的に抑制していることがわかる。また、Z の導入についても、Y=180msec の時、Z を 1 から 5 へ増加させると、46.4% から 11.9% へと減少しており、データ損失率の改善が認められる。

実機による実験結果とシミュレーションによる結果を比較すると、データ損失率の数値には若干のちがいが見られる。特に、端末数が 25 台の時のデータ損失率の平均値の場合、実機による損失率はシミュレーションの損失率よりも若干低くなっている。この違いは、実機とシミュレーションにおけるプリアンプルの実装の違いによるものと考えられる。このシミュレーションにおいては、プリアンプルの衝突は、たとえそれが僅かであっても、パケットの損失として扱われる。しかし、実機の実装においては多少のプリアンプルの衝突は無視され、パケットの送信は成功する。この違いによる影響は、ネットワークの負荷が高く衝突の確率が高い場合に顕著に現れる。このため、比較的負荷が高い端末数が 25 台の実験結果において、シミュレーションのデータ損失率は実機のデータ損失率よりも高くなる。この影響を考慮すると、Y 及び Z によるデータ損失率の改善の効果における傾向はほぼ一致しており、5-3-2 で行ったシミュレーションによる提案プロトコルの評価が妥当であることが確認された。

#### 5-3-4 回線容量の検討

全くコリジョンが発生しない状態を仮定した理論的に許容可能な最大端末数は、各端末が基本的に X 秒間隔で送信を繰り返すため、X、回線速度(bps)およびパケット長(bit)から求めることが可能である。5-3-3 における条件で収容可能な端末数は、回線速度が 60kbps、X が 200ms であることから、Z=1 で 88 台、Z=3 で 71 台および Z=5 で 60 台となる。5-3-3 では端末数を 25 台としているので、損失率の平均値が最小の 4% となった Z=5 の場合において、最大端末数の 41.7% の端末が許容されている。受信回路を有しキャリアセンス及び ACK による受信確認を行った場合でも、図 5.13 に示すように隠れ端末の増加によって急速に損失率が上昇することを考慮すると、隠れ

端末数に依存しないという条件で十分な端末数が許容されていると考えられる。

### 5-3-5 電力消費

提案プロトコルを実装し受信回路を省略した場合と、受信回路を搭載してキャリア検出と ACK 受信を行う場合について、電池寿命をそれぞれ検証した。

電池は一般的なコイン電池を想定して容量を 225mAh とし、一定時間間隔 X は 1 秒とする。また、センサーネット端末における送受信の動作は、キャリアセンスと ACK の受信双方を行う場合、大きく分けて受信モジュールの設定、RSSI、送信及び ACK の受信から構成される (図 5.26)。そこで、それぞれの動作に必要なとされる消費電流を試作機で実測し、この値をもとに計算により電池寿命を算出する。試作した回路を用いて受信に要する時間と消費電力を計測したところ、RFIC 回路に電源を投入して受信が可能となるまでに初め 2.2msec の間は消費電流が 17mA、その後 2.2msec の間消費電流が 23mA となり、その後受信が可能となることが判った。キャリアセンスを行うためにはこの RFIC 回路の電源投入処理の後、0.5msec 受信処理を行う (その際

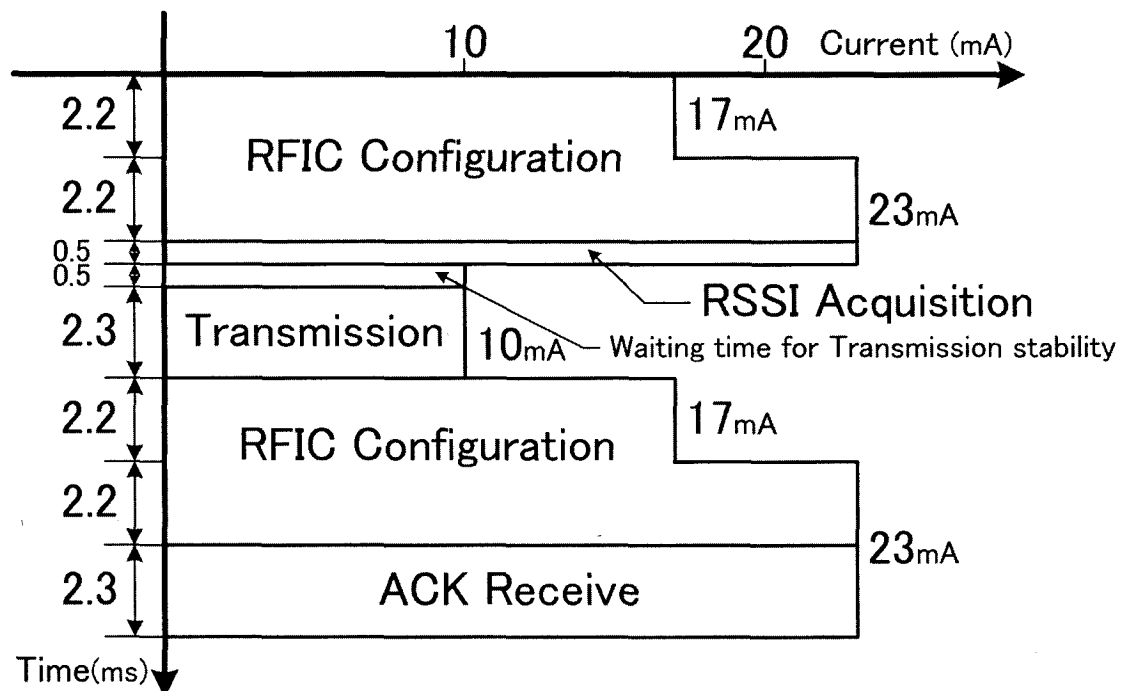


図 5.26. センサーネット端末における送受信モード

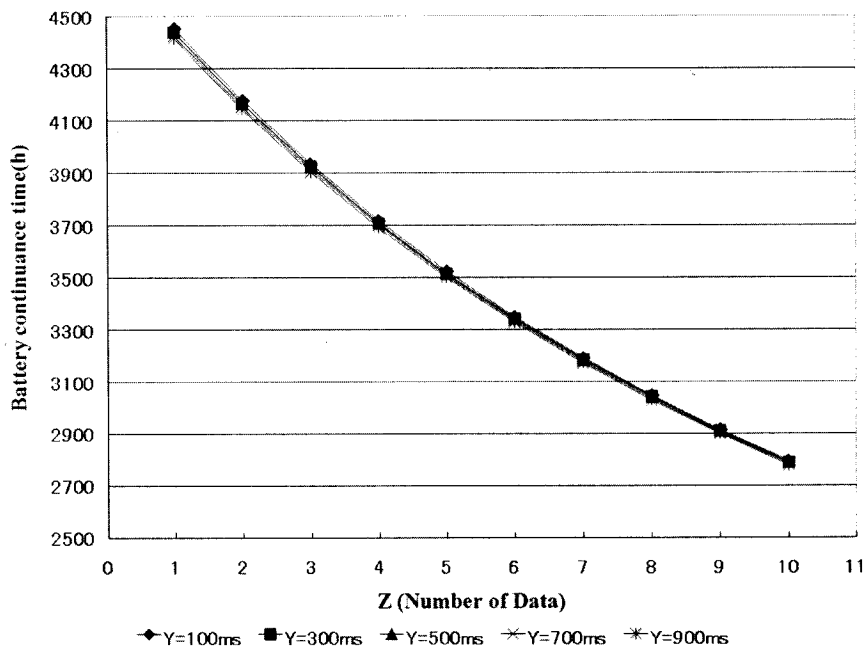


図 5.27. Y と Z の導入が電池寿命に与える影響

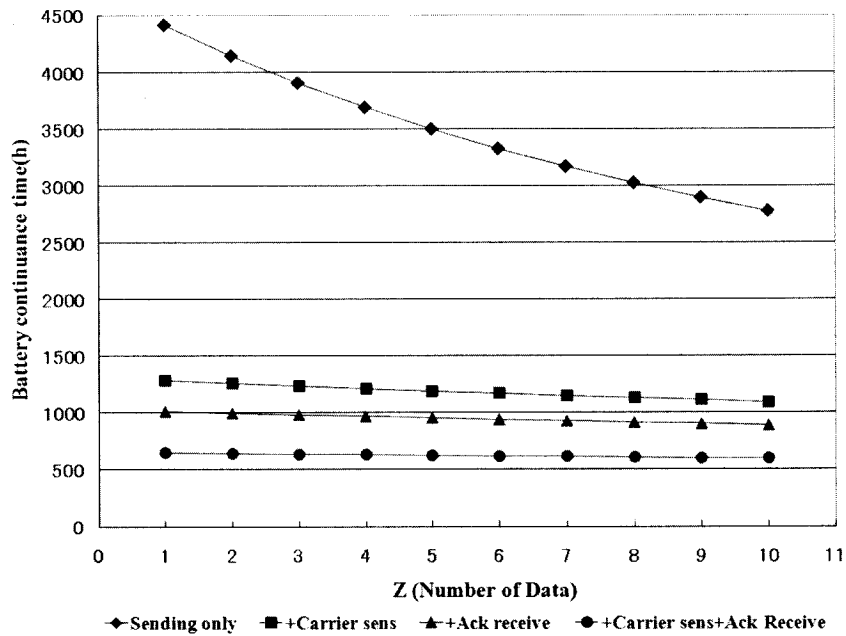


図 5.28. 受信動作ありの場合の電池寿命 (Y=900msec)

の消費電流は 23mA)。ACK 受信に際しては、同様に RFIC 回路の電源投入処理の後、ACK パケット受信の間の消費電流は 23mA であった。また、送信回路の消費電流は 10mA を要することが試作した回路を実測して明らかとなった。まず、受信回路なしの状態では、提案プロトコルにおけるパラメータである Y と Z が、電池寿命に与える影響を計算したのが図 5.27 である。Z を 1 から 10 まで変化させると、電池寿命はほぼ半減してしまうことがわかる。これは、Z の増加は単純にパケット長に反映されるため、パケット長が長くなることにより送信に必要な時間が増加するため、電池寿命が短くなると考えられる。これに対して、Y を 100msec から 900msec まで変化させても、送信タイミングをずらしているだけなので電池寿命にはほとんど影響がない。ただし、Y の増加に対してわずかに寿命の減少が見られるが、これは本システムのセンサーネットワーク端末のスリープ状態を計測するタイマの最大設定値が 250msec であり、Y の値がこれを超える場合スリープ状態から一時的に復帰する必要があるため、これに要する微弱な電力が増加するためである。

受信回路なしの場合に対して、受信回路を設けた上でキャリアセンスのみあり、ACK 受信のみあり及びキャリアセンスと ACK 受信の双方ありの場合の電池寿命を、Y=900msec として計算したものが図 5.28 である。提案プロトコルにおける受信回路なしの場合では、Z=1 の場合で 4500 時間となり Z=10 の場合では 2800 時間となる。

受信回路を有して、キャリアセンスと ACK 受信を実装した場合、一般的には Z=1 であり、この時の電池寿命は 650 時間となっている。さらに、Z を 2 から 10 まで変化させた際の電池寿命についても計算したが、受信回路有りの場合、Z が電池寿命に与える影響はごく僅かであった。この値に対して、提案プロトコルにおける電池寿命は、Z=1 の場合で約 7 倍、Z=10 の場合で 4 倍となっている。

今回の計算では、一定時間間隔 X センサネットワークとしては非常に短い 1 秒として計算しているため、仮にこれを 10 秒とすると、Z=1 の場合で約 5 年、Z=10 の場合でも約 3 年の電池寿命を実現出来ることになる。受信回路の省略により、省電力化が実現されていることが確認された。

#### 5-4 結言

本章では、受信回路を省略した端末機器を利用するセンサーネットワークの実現のため、キャリアセンスと ACK の受信を必要としない新たなプロトコルの提案を行った。

センサーネット端末が受信回路を持たないと、キャリアセンスが行えないためコリジョンの多発を招き、特に常時衝突端末の発生によってシステムの性能を著しく低下させてしまう。また、ACKの受信が行えないためデータ到達の確実性を損ねてしまうという問題があった。そこで、本章において、受信回路を持たない端末によるセンサーネットについて、新たな提案プロトコルにおけるデータの損失率と電池寿命に係る下記の4点を確認した。

(1)キャリアセンスを行わない送信の場合、各センサーネット端末が勝手に送信を繰り返すため、常時衝突端末が発生してしまう。このため、センサネットワークにおけるデータ損失率の最大値が100%となってしまう問題があった。しかし、各センサーネット端末の送信に際してランダム遅延時間を設けることにより、データ損失率の最大値を50%以下に改善することができた。

(2)ACKの受信が行われなかったため、各センサーネット端末は、送ったデータが相手に確実に送信されたことを確認することができない。このため、コリジョンによりパケットが破棄されると、そのパケット中のデータは失われてしまうことになる。しかし、(1)のランダム遅延時間の設定とあわせて過去データの重複送信を行うことによりデータ損失率の平均値を3%程度まで改善することができた。

(3)(1)(2)で提案したプロトコルを実機に実装して行った実験についても、シミュレーション同様に大幅な改善がみとめられ提案が有効であることが確認された。

(4)実機の各動作における消費電流を測定し、センサーネット端末の電池寿命の計算を行った。この結果、受信回路の省略が電池寿命の延長に対して有効であることを確認した。

今後は、長野県塩尻市におけるAd-Hocネットワークにおけるセンサーネット端末として開発を進め、農業、医療及び防災などの分野における、実際のアプリケーション化を行う予定である。

## 参 考 文 献

- [1] Kahn, J. M., R. H. Katz and K. S. J. Pister, "Mobile Networking for Smart Dust", ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99), Seattle, WA, Aug. 1999
- [2] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", IEEE INFOCOM, 2002.
- [3] T. van Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," ACM SenSys, pp.171-180, 2003.
- [4] G. Lu, B. Krishnamachari, and C.S. Raghavendra, "An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks," IEEE IPDPS, pp.224-231, 2004
- [5] S. Du, A.K. Saha, and D.B. Jhonson, "RMAC: A routing-enhanced duty-cycle MAC protocol for wireless sensor networks," IEEE INFOCOM, vol.3, pp.1478-1486, 2007.
- [6] 渡辺 貴文 , 森戸 貴 , 南 正輝 , 森川 博之, "電波時計を用いた同期型バッテリーレス無線センサネットワークの設計と実装", 電子情報通信学会技術研究報告. MoMuC, モバイルマルチメディア通信 107(39), pp113-118, May.2007
- [7] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks," ACM SenSys, pp.95-107, 2004
- [8] M. Buettner, G.V. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycle wireless sensor networks," ACM SenSys, pp.307-320, 2006
- [9] E.A. Lin and J.M. Rabaey, "Power-efficient rendezvous schemes for dense wireless sensor networks," IEEE ICC, pp.3769-3776, 2004
- [10] ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org/en/>



## 第 6 章

### 結 論

## 第 6 章

# 結 論

本研究は、無線 Ad-Hoc ネットワークを基盤とした、安全・安心な社会生活を保証する情報通信基盤の構築と、その上で運用されるアプリケーションの開発に関するものである。その具体的内容は大きく 3 つあり、その第 1 は、無線 Ad-Hoc ネットワークによる情報通信網の構築であり、第 2 はそのネットワーク上で平常時に運用されるアプリケーションとしての地域見守りシステムの構築である。そして第 3 は、情報収集のためのあたらな手段として注目されている、センサネットワークの性能評価である。これらの課題は、国策として固定系と移動系のネットワークが融合したユビキタス環境の整備が進められる中で、それらを利用してより良い社会を実現するための取り組みである。

近年大規模な災害が増加傾向にあるなかで、災害発生時における緊急かつ大量の情報の流通を保証するための災害に強い情報通信基盤が求められている。これに対する有効な解決策として注目されているのが無線 Ad-Hoc ネットワークである。アクセスポイント等の固定局を必要とせず、自律分散な運用が可能であるため、生き残った端末間で自動的に経路が再構成され常に接続が保証されるためである。また、様々な情報を無線により収集することが可能なセンサネットワークシステムも、災害の予防や予知の有効な手段として注目されている。

本研究では、長野県塩尻市に無線 Ad-Hoc ネットワークによる情報通信網を整備し、平時のアプリケーションとして児童を見守る地域見守りシステムを構築する。さらに、センサネットワークとの融合を目指して新たなセンサ端末とそのプロトコルを提案する。これにより、災害時にも迅速に有効な通信手段として利用可能な、安全・安心な社会を実現する無線情報基盤の構築・運用の確立を目指すものである。

本論文は、地域見守りシステムとしての無線 Ad-Hoc ネットワークの構築と、センサネットワークにおける新しい端末とプロトコルの提案を対象としている。第 2 章、

第3章及び第4章が無線 Ad-Hoc ネットワークによる地域見守りシステムを、第5章がセンサネットワークを対象とし、全体は6章で構成されている。

第1章は序論で、本研究の背景となる我が国における情報通信基盤整備の状況、近年の災害時における情報通信基盤の現状や児童を取り巻く犯罪の状況について紹介し、本研究の位置づけを明確にした。さらに、こうした背景のもとでの本研究の目的を明らかにしている。

第2章では、現在実稼働中である、長野県塩尻市に構築した無線 Ad-Hoc ネットワークによる地域見守りシステムについて、児童が持つ子機、市内に配置された中継機、さらにそれらの無線規格及びパケット構成などの詳細を述べる。特に、中継機を太陽電池パネルと2次電池により独立した電源系としたこと、及び通信回線が無線 Ad-Hoc ネットワークとしたことにより、災害時にも有効な無線情報基盤となる特徴を明らかにした。

第3章では、地域見守りシステムの特徴的な問題として、「一つの中継機に多数の子機が集中した際にパケットの損失率が上昇する問題」、「狭いエリアに中継機を複数増設した場合、一つの子機からのパケットを複数の中継機が同時に受信し、それぞれが ACK 送信とパケットの中継を行うためトラフィックが増大しパケット損失率が上昇する問題」の2つが確認されていた。そこで、子機の送信タイミングに適切な固定長の待ち時間を導入することにより、子機が190台まで集中する状況でもシステムの目標であるパケット損失率5%以下に抑制することを明らかにした。さらに、同じ子機からのパケットを受け取った複数の中継機において、1つの中継機のみが ACK 送信及びパケット転送を行う重複抑制のプロトコルを導入し、3台の中継機がさらし関係で存在するエリアに子機が240台集中しても、パケット損失率を5%以下に抑えられることも明らかにした。

第4章では、地域見守りシステムとしての評価は、通信路におけるパケットの損失だけでは不十分であるため、児童が子機を実際に利用している状況下で、どの程度のパケット損失が発生しているのか評価を行った。サーバが受信した子機パケットのログデータを調査したところ、72.8%の子機のパケット損失率が5%以下であることを明らかとした。さらに、損失率が高い子機については、中継機のエリアの問題であることも明らかにした。また、本システムを利用している児童の保護者に対してアンケート調査を実施し、50%の利用者がシステムに満足、さらに71.6%の利用者がその効果を実感していることを明らかにした。

第5章では、受信回路を省略したセンサ端末と、その端末を利用するセンサネットワークのための新たなプロトコルを提案し、データ損失率と電池寿命について検討した。データ損失率に関するシミュレーション及び実機による実験では、データ損失率の最大値を50%以下、同平均値を5%以下に抑えることが可能であることを明らかにした。さらに、受信回路を内蔵する端末に比べて、電池寿命を4~7倍に延伸できることを明らかにした。

以上、各章に示したこれらの成果により、無線 Ad-Hoc ネットワークとセンサネットワークを用いた情報通信基盤の整備が進み、これを基にした安全・安心な社会の実現のための様々なシステムの構築が行われるものと考えられる。本論文の成果は、単なる実験室レベルでの検討にとどまらず、長野県塩尻市において実運用されているシステムにおける成果であるという大きな特徴を持っている。これらの方法が、ユビキタス時代における新たな情報基盤システムの構築に活用されることを期待する。

本論文に関する発表論文等

## 本論文に関する発表論文等

### 1 学術論文

- (1) Hiroaki NOSE, Miao BAO, Kazumasa MIZUTA, Yasushi YOSHIKAWA, Hisayoshi KUNIMUNE, Masaaki NIIMURA and Yasushi FUWA, Proposal and Evaluation for Miniaturization and Power Saving of Sensor Network Terminals, IEICE Trans. Fundamentals, Vol E93-A No.10(2010), pp.1735-1743.
- (2) 野瀬裕昭 不破泰 新村正明 國宗永桂 本山栄樹 金子春雄, 無線 Ad-Hoc ネットワークによる地域見守りシステムの開発, 電子情報通信学会論文誌, Vol J95-B No.1(2012), pp.1-18

### 2 国際会議

- (1) Hiroaki NOSE, Miao BAO, Kazumasa MIZUTA, Yasushi YOSHIKAWA, Hisayoshi KUNIMUNE, Masaaki NIIMURA and Yasushi FUWA, Proposal and Evaluation for Wireless Sensor Network which use Terminal that Eliminated Receiver Circuit, Proc. of The Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2010), pp.6-11, June 2010.
- (2) Hiroaki NOSE, Miao BAO, Kazumasa MIZUTA, Yasushi YOSHIKAWA, Hisayoshi KUNIMUNE, Masaaki NIIMURA and Yasushi FUWA, Terminal Design without using Receiver Circuits for Wireless Sensor Networks, Proc. of Second International Conference on Ad Hoc Networks (ADHOCNETS2010), August 2010.

### 3 国内講演

- (1) 野瀬裕昭 新村正明 國宗永桂 本山栄樹 不破泰, 無線 Ad-Hoc ネットワークによる地域見守りシステムの開発, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, (2010), pp.S-45 - S-46
- (2) 野瀬裕昭 本山栄樹 鈴木彦文 不破泰, 無線 Ad-Hoc ネットワークによる地域見守りシステムの開発と評価, 第1回安全・安心な生活のための情報通信システム研究会講演論文集, (2012), pp.1-6.

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、その機会をお与え頂くとともに、本論文の作成及び研究の推進に際して多くのご教授を賜り、また終始かわらぬ激励と懇切丁寧なご指導、そしてご鞭撻を賜りました信州大学大学院工学系研究科教授 不破泰博士に対し、謹んで深く感謝申し上げます。また、御指導並びに御助言を賜りました信州大学工学部准教授 新村正明博士、同助教 國宗永佳博士に心より御礼申し上げます。

本研究では、長野県塩尻市において構築され実運用が行われている地域見守りシステムをその対象とさせて頂きました。同市の益々のご発展をお祈りするとともに、本研究について多大なご支援とご協力を頂きました、塩尻市 金子春雄氏、並びにアンケート調査に際しまして多大なご協力をいただきました、同市教育委員会 宮原勝広氏、北条知奈美氏に心から深くお礼申し上げます。また、同システムに関して様々な御助言を頂きました、㈱長野日本無線の本山栄樹氏に心から深く御礼申し上げます。

本研究で利用させて頂きましたセンサーネット端末の開発について、多大なご協力とご助言をいただきました、セイコーエプソン株式会社の吉川泰史氏並びに水田一正氏に心から深く御礼申し上げます。

本学博士課程への入学における大きな御配意を頂きました、長野県工業技術総合センター・情報技術部門 前部門長 丸山久友氏、元情報システム部長 酒井伸博士に深く感謝申し上げます。

本学博士課程における研究の推進に対して深いご理解とご協力を頂きました、長野県工科短期大学校 前校長 大澤清一博士、校長 藤井恒男博士、副校長 三木一隆博士、情報技術科 前学科長 中村貴幸博士、情報技術科 学科長 桃井貞美氏に深く感謝申し上げます。そして、筆者の在籍する同学情報技術科教員の皆様には、研究の推進について深いご理解とご協力を頂きました。心より御礼申し上げます。

ここに、ご協力いただきました全ての皆様に心から厚く御礼申し上げます。



本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度「自治体全域を網羅する安心・安全な街創りのための高耐障害性アドホックネットワークシステムの開発(072304002)(H19～H20)」,「Ad-Hoc ネットワークとセンサネットワークを用いた高耐障害性地域災害通信システムの研究開発(092304014)(H21～H22)」および「地域全体の安全・安心を確保する防災・減災および鳥獣センシングを実現するセンサーネットワークシステムの研究開発(112304003)(H23～H24)」の助成を受けて行われました。

最後に、本学博士課程への入学と研究の推進について、物心ともに多大な応援をしてくれた父野瀬佐幸、母野瀬美智子、そして常に私を支え続けてくれた妻華世と娘の絢香と結香に、この場を借りて心から感謝する。