T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ワイヤレスセンサネットワークにおけるデータ到達率向上に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	石橋孝一
Author(English)	Koichi Ishibashi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10695号, 授与年月日:2017年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山岡 克式,植松 友彦,府川 和彦,山田 功,北口 善明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10695号, Conferred date:2017/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

ワイヤレスセンサネットワークにおける
データ到達率向上に関する研究

［学位論文］

2017 年 10 月

指導教官　山岡　克式　准教授

提出者　石橋　孝一

目次

第 1 章　序論 4
1．1.　研究の背景 4
1．2.　ワイヤレスセンサネットワーク 5
1．3.　研究の位置付け 7
1．4.　論文の構成 8
第 2 章　ワイヤレスセンサネットワークを活用したデータ収集システム 10
2．1.　まえがき 10
2．2.　ワイヤレスセンサネットワークの活用 10
2．2．1.　スマートグリッド・スマートコミュニティとセンサネットワーク 11
2．2．2.　M2M/IoT におけるセンサネットワーク 13
2．3.　データ収集システム 18
2．4.　むすび 21
第 3 章　ワイヤレスセンサネットワークに向けた経路制御方式の課題 22
3．1.　まえがき 22
3．2.　無線マルチホップネットワーク技術 22
3．3.　ワイヤレスセンサネットワークへの適用に向けた経路制御方式 25
3．4.　RPL 27
3．5.　無線マルチホップネットワーク技術の課題 30
3．6.　むすび 36
第 4 章　ワイヤレスセンサネットワークにおけるネットワーク安定性向上のための経路メンテナンス手法 37
4．1.　まえがき 37
4．2.　ネットワーク安定性に関わる課題 38
4．3.　無線リンク障害発生時のデータ到達率 40
4．4.　経路平滑化メカニズム 43
4．4．1.　セットアップ・フェーズ 44
4．4．2.　局所エリア抽出フェーズ 45
4．4．3.　局所経路再選択フェーズ 46
4．5.　評価・考察 47
4．5．1.　コンピュータ・シミュレーション 47
4．5．2.　基礎評価 48
4．5．3.　ノード密度による評価 53

4．5．4.　ノード配置による評価 54
4．6.　むすび 55
第5章　緊急呼の通信品質向上を図るデータ通知手法 57
5．1.　まえがき 57
5．2.　緊急呼の転送に関わる課題 59
5．3.　緊急呼のデータ転送 61
5．3．1.　複数パスによる同時転送手法の概要 62
5．3．2.　特定ノードに向けたN次冗長の経路探索 63
5．3．3.　複数パスによるホップ・バイ・ホップ転送 64
5．4.　コンピュータ・シミュレーションによる評価 66
5．4．1.　シミュレーションモデル 66
5．4．2.　シミュレーション結果及び考察 68
5．5.　無線センサノード上への実装及び評価 73
5．5．1.　センサノード上への実装 73
5．5．2.　センサノードを用いた実験結果 75
5．6.　むすび 77
第6章　ワイヤレスセンサネットワークの安定運用に向けた取組み 78
6．1.　まえがき 78
6．2.　複数種類のノードの存在を前提とした経路制御方式 79
6．3.　経路集約によるネットワークの安定化 80
6．3．1.　大規模なツリー型ネットワーク構築の課題 80
6．3．2.　経路集約手法 81
6．3．3.　経路集約手法の実装 84
6．3．4.　経路集約手法の評価 84
6．3．5.　経路集約手法に対する考察 86
6．4.　むすび 87
第7章　結論 88
・　謝辞 90
・　参考文献 91
・　図目次 96
・　表目次 99
・　発表論文 100

第1章　序論

1．1．研究の背景

無線通信技術の進展，及びセンシングやアクチュエータ機能に加えてデータ処理や通信機能を備えた低コスト・低消費電力なセンサノードの普及に伴い，1990 年代後半よりワイヤレスセンサネットワークへの関心が高まった．そして，新しいアプリケーションの創出に向けた研究開発への取組みがなされてきた[1][2][3][4]．ここで，ワイヤレスセンサネットワークを活用したアプリケーションとしては，家庭や玩具・ゲーム業界での新しいユーザインタフェースやサービスの提供，自動車等の盗難防止，設備等の異常監視，ヘルスケアなどが挙げられ，各所で実証実験が行われてきている．

特に国内では，2004 年に「ユビキタスセンサネットワーク技術に関する調査研究会」が総務省により開催され，ワイヤレスセンサネットワークに関する研究開発が活発化した．この調査研究会では，異なるベンダによるセンサノード間でも情報の連携ができるようにした「OPEN 型センサネットワーク」が議論されるとともに，センサノードが至る所に遍在する「ユビキタスセンサネットワーク」の実現に向けた研究開発が行われた[5][6]．

また，近年では，通信機能を有するセンサノードを活用した M2M (Machine-to-Machine) や IoT (Internet of Things)への関心が高まっており，家庭やビルディングにおけるエコシステムや広域なエリアに跨った温度・湿度などの環境モニタリングに向けた取組みについても注目を集めており，ワイヤレスセンサネットワークを用いたモニタリングシステム(データ収集システム)が研究開発されている[7][8]．さらに，情報通信技術の活用による効率的な電力供給システムの実現を目指すスマートグリッドに対する議論が各所で行われており，その中核となるスマートメーターを収容するスマートメーターネットワークにおいても，1 つの実現手段としてセンサネットワーク技術の適用が議論されている[9][10][11][12]．

このように，ワイヤレスセンサネットワークについては各所で実証実験が行なわれてきた．そして，実証実験で目指すアプリケーションに応じて，多数の無線センサノードからなるネットワークの構成や各無線センサノードの低消費電力化，ネットワークの安定性向上などに向けて，様々な経路制御方式が提案されてきた．しかしながら，無線センサノードからなるワイヤレスセンサネットワークの構築に加えて，センサネットワークを活用したアプリケーションの普及，すなわち実証実験の領域から出て，広くセンサネットワーク

が活用されるためには，アプリケーションに応じた確実性や信頼性を備えた頑強なワイヤレスセンサネットワークの実現が求められる．ここで,「頑強なワイヤレスセンサネットワーク」とは，無線環境の変動などに対して，アプリケーションから見て確実にデータを集めること,及び必要な情報を無線センサノードに通知できるネットワークとして定義する．上記のワイヤレスセンサネットワークの実現に向けては，ネットワーク構築に関わる経路制御方式の研究開発だけに留まらず，無線センサノードの持つリソース(CPU 処理能力やメモリ量)，及び無線帯域を考慮しつつ，データ収集や緊急通報などのアプリケーションと連携した研究開発が必要である．以上を踏まえて，本論文では，広域なエリアに跨って配置される無線センサノードが保持する情報を，遠隔のサーバにて定期的に収集するデータ収集システムの構築に関わる研究について論ずる．具体的には，アプリケーション観点から見たノードの公平性や時空間的に変動する無線環境に応じた頑強性を実現する経路制御方式，ならびに，データ種別に応じたデータ転送手法の研究について述べる．

1．2． ワイヤレスセンサネットワーク

ワイヤレスセンサネットワークとは，無線通信機能を有するセンサノードをセンシングの対象となるエリアに設置し，センサノード同士で協調してネットワークを構築し，センサノードより情報を収集するネットワークである.無線を使用することにより配線が不要,及び設置場所の制約が緩和されることなどにより,幅広い分野での適用が期待されている．そして，近年では，自動車や家電などの現実世界のありとあらゆる物が人の手を介することなくネットワークにつながる M2M や全ての物をインターネットに接続する IoT に向けた重要な技術の 1 つとして注目を集めている．尚，ワイヤレスセンサネットワークの形態としては，スター型やツリー型，メッシュ型などのネットワーク形態があるが，本論文では，各センサ端末を数珠つなぎに接続することにより，ネットワークインフラを必要とせず，安価に且つ容易に広範囲に跨るネットワークの構築が可能であるメッシュ型或いはツリー型のネットワーク形態に基づくワイヤレスセンサネットワークを対象とする．

まず，センサネットワークのこれまでの取組みについて振り返る．センサネットワークの研究開発は，1980 年代の軍事研究を主体とした研究からスタートした．ここで，当初の研究では，有線によるセンサネットワークの研究が中心であり，センサ端末の設置やネットワークの構築が困難であるだけでなく，接続するセンサ数が限られおり，利用範囲は限られていた．しかしながら，1990 年代後半より，無線通信技術の進展やセンサ端末の機能

向上とあいまって，ワイヤレスセンサネットワークへの期待が高まり，無線通信技術に基づくセンサネットワークに関わる研究開発が加速してきた．

このような中，ワイヤレスセンサネットワークに関連する取組みの一例として，ユビキタスネットワークやユビキタスセンサネットワークが挙げられる．ユビキタスネットワークでは，インターネットの世界において「いつでも，どこでも，誰とでも」つながるネットワークを実現する技術開発として，2001 年に「ユビキタスネットワーク技術の将来展望に関する調査研究会」が総務省より立ち上げられ，インターネットに続く研究開発テーマとして議論が行われた．さらに，2004 年には，「ユビキタスセンサネットワーク技術に関する調査研究会」が総務省により開催され，センサネットワークに特化した研究開発が進められた．

このユビキタスセンサネットワークに関わる研究開発では，特に，センシングデータの持つ意味を残したまま，“データ容量を 1/100 以下に削減”し，“200 台の同時協調制御”を実現するアンチ・コリジョン技術や時刻同期技術，センサノードによる自律分散によるネットワーク構築を実現するアドホックネットワーク技術，センサ位置同定技術，及び遠隔保守管理技術，そして，膨大な数のセンサを効率的に接続し，緊急時等の優先データ転送を実現するセンシングデータ処理技術やデータマイニング技術の研究開発が行なわれた[13][14].

これらの技術により，ユビキタスセンサネットワークでは，状況認識により提供サービスの自律的な切替・連携が可能となり，ユーザのいる場所に，いつでも受けたい適切なサービスを届けることが出来るようになることが期待された．しかしながら，ワイヤレスセンサネットワーク，ユビキタスネットワーク或いはユビキタスセンサネットワークについては，各種の実証実験により個々の技術的課題への研究は進んだが，以下の理由などにより，多様な用途にて広く普及し活用されるには至らなかった[15].

①多様な用途への展開における障壁，すなわち，無線センサデバイスの開発プラットフォームが限られており，活用時のプラットフォームの選択が限定的であったこと，

②大規模な展開への障壁，すなわち，個別システムや個別アプリケーションでは，小さな市場規模であったこと，

③コスト対導入効果に対する障壁，すなわち，センサデータを収集することによる利点が不明確であったこと．

上記に対して，近年では，

①多様な無線センサデバイスの出現，

②センサや NFC (Near Field Communication)，位置情報の API などが具備されたスマートフォンの普及に伴い，センサ情報を用いたアプリケーションやサービスが身

近になったこと，

③M2M に対する関心が通信事業者やベンダにおいて高まってきたこと，

④Google や Amazon によるサービス導入に伴い，「データを集める」ことの重要性が従来以上に認識されつつあること，

などにより，ワイヤレスセンサネットワークを活用したサービスに対する期待が高まっている．そして，このようなワイヤレスセンサネットワークの実用化に向けた流れを，M2M やモノのインターネット(IoT)などという言葉で表現し，各所で研究開発が進められている．

以上のように，ワイヤレスセンサネットワークに関しては，センサなどの実空間に埋め込まれたデバイスまでを接続するユビキタスネットワーク，或いはユビキタスセンサネットワークの研究開発が 2000 年代に行われてきたが，2010 年代になってようやく多様な用途での実用化及び爆発的な普及が視野に入り，M2M や IoT などとして研究開発が進められている．しかしながら，これまでは，実証実験による特定のアプリケーションやサービスを想定した中での技術検証が主であり，真の普及に向けては，多様なアプリケーションやサービスに対応するための経路制御技術やデータ転送技術，アクセス制御技術，及び長期的な運用・管理の面からのネットワーク運用技術など取り組むべき技術課題は残されている(図 1.1).

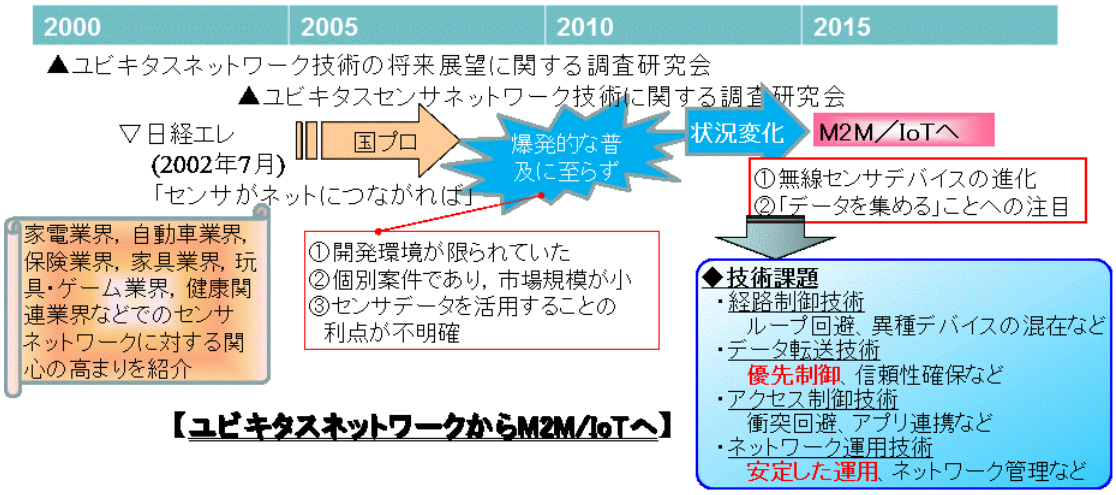


図 1.1　ユビキタスネットワークから M2M/IoT へ

1．3．研究の位置付け

ワイヤレスセンサネットワークに関わる研究開発については，無線センサノードからなるネットワーク構築のための経路制御技術を中心に数多くの議論がなされてきた[2][3]．ま

た，特定のアプリケーションに対応するため，アプリケーションに応じた要求を満たすことに注力がなされた実証実験が進められてきた．そのため，経路制御技術についても，ネットワーク層での解決に加えて，ネットワーク層と実証実験で用いられる無線に起因する下位層からの情報との連携による解決を目的とした研究開発が数多くなされてきた．

しかしながら，ワイヤレスセンサネットワークが様々な環境で活用され，普及していくためには，経路制御技術によるネットワーク構築に加えて，ワイヤレスセンサネットワークを安定的，かつ持続的に運用することが求められるとともに，アプリケーションの観点から見て確実なデータ収集や特定のデータに対する優先制御による緊急通報などの実現が求められる．

そこで，本論文では，スマートメーターネットワークや M2M/IoT における環境モニタリングなどに代表される，広域なエリアに跨って配置される無線センサノードが保持する情報を遠隔のサーバにて定期的に収集するデータ収集システムを対象として，課題を検討し，解決する．まず，各無線ノードとゲートウェイ間の通信に対して，無線リンク障害発生時のデータ到達率を評価指標として導入し，安定したデータ収集の観点からネットワーク安定性向上に向けた経路メンテナンス手法を提案する．提案する経路メンテナンス手法により，平均的に確実にデータを収集することが求められるだけでなく，安定してデータを収集することが重要である監視ネットワークなどに対して，ツリー型ネットワークにおける各ノードへの経路の公平性，すなわち安定したデータ収集が可能となる．

次に，ワイヤレスセンサネットワークを構築するセンサノードにおいて異常を検知した際に，特定のノード，具体的にはゲートウェイとなるノードに対して，緊急且つ確実にメッセージを通知するためのデータ転送手法を提案する．提案するデータ転送手法により，無線リンク上のパケット損失率が大きいワイヤレスセンサネットワークにおいても，アプリケーションの観点から緊急性且つ確実性を要求するメッセージを所望のノードに対して，求められる信頼性のもとで転送することが可能となる．

1．4．論文の構成

本論文は以下のように構成されている．まず，第 2 章では，スマートグリッド・スマートコミュニティにおける課題を説明するとともに，ワイヤレスセンサネットワークによる課題解決の事例を示す．また，すべてのモノがネットワークに接続される M2M や IoT の社会到来に向けた研究開発事例及びワイヤレスセンサネットワークの活用可能性を示す．

そして，本論文で対象とするワイヤレスセンサネットワーク技術を活用したデータ収集システムを定義する．次に，第 3 章では，既存の通信インフラを必要とすることなく，端末同士でのネットワークの構築を実現する経路制御方式について概観するとともに，ワイヤレスセンサネットワークへ適用する際の課題について説明する．第 4 章では，無線リンク障害発生時のデータ到達率を用いて，各無線センサノードから一定周期でデータを収集するデータ収集システムの実現に向けた，ネットワーク安定性を向上させる経路メンテナンス手法について述べる．第 5 章において，ワイヤレスセンサネットワークを構成する無線センサノードからの緊急性且つ確実性を求めるメッセージを特定のノードに対して転送するためのデータ転送手法について述べる．さらに，第 6 章では，ワイヤレスセンサネットワークの安定した運用に向けて，複数種類のセンサノードよりなるワイヤレスセンサネットワークにおいて，各センサノードの持つリソース量を考慮した経路制御方式について説明するとともに，中継ノードにおける経路テーブル量の削減を可能とする同一方向に向けた経路を効率的に集約する手順について述べる．最後に，第 7 章では，本論文を統括する．

第2章　ワイヤレスセンサネットワークを活用したデータ収集システム

2．1．まえがき

ワイヤレスセンサネットワークについては，古くから取組みが行われてきており，様々な適用例が示されてきた. 本章では, ワイヤレスセンサネットワークの活用の一例として，近年，特に注目を集めているスマートグリッド・スマートコミュニティにおけるセンサネットワーク技術の活用，及び M2M/IoT におけるセンサネットワークについて説明する．上記活用例の中で示すように，ワイヤレスセンサネットワーク技術により「データを集めること」について関心が高まっており，本論文でも，広域に設置される無線センサノードより定期的にデータを収集するデータ収集システムの実現を考える．そこで，本章の後半では，ターゲットとするワイヤレスセンサネットワーク技術に基づくデータ収集システムについて説明するとともに，そのデータ収集システムにおけるアプリケーション例や求められる要件について述べる．

2．2．ワイヤレスセンサネットワークの活用

センサネットワークについては，古くから取組みが行われてきており，様々な実証実験を通してワイヤレスセンサネットワークを活用した数多くのアプリケーションが検証されてきた．しかしながら，前章でも述べたように広く普及するには至らなかった．そのような中，2010 年頃より「データを集めること」に対する要求が高まり，スマートグリッドやビッグデータなどをキーワードとして, ワイヤレスセンサネットワークに対する研究開発, 及び普及に向けた実証実験への取組みが再燃し，ビジネスの側面からの研究開発も加速してきた.

以下に，ワイヤレスセンサネットワーク活用の一例として，スマートグリッド・スマートコミュニティや M2M 及び IoT におけるセンサネットワークの活用について説明する.

2．2．1．　スマートグリッド・スマートコミュニティとセンサネットワーク

(1)スマートグリッドの背景と課題

スマートグリッド・スマートコミュニティについては，再生可能エネルギー導入拡大に伴う電力系統の安定化や節電・停電対策，業務効率化などを実現するための次世代技術として，国内外で数多くの技術開発や実証実験が行われている[16][17][18][19].

ここで，スマートグリッド導入の背景は，先進国や新興国などの国状や各国の電力系統システムの導入状況などによって異なるが，国内においては，①再生可能エネルギー導入拡大への対応や②震災に起因した電力供給力不足への対応が主目的となっている．このスマートグリッド導入の目的に対する課題，及び課題への対応技術を表 2.1 に示す.

表 2.1　スマートグリッドの課題と対応技術

課題		対応技術
再生可能エネルギー導入拡大	需給アンバランス	・需給制御
	逆潮流による配電電圧上昇	・配電制御
震災に起因した電力供給力不足	電源の増強	・分散型電源
	需要の抑制	・自動検針システム ・デマンドレスポンス
	電力自給自足	・自立運転

まず，再生可能エネルギー導入拡大についての課題から述べる．現時点では，電力は基本的に貯蔵ができないが,消費側は電力を任意に使ってよいことになっている.このため，電力会社にて，瞬時瞬時において発電量と電力消費量を一致させるようにバランスをとる需給制御を行っている．具体的には，電力会社管内のすべての火力発電機や揚水発電機の発電出力を秒単位で制御している．ここで，再生可能エネルギーの代表例である太陽光発電の出力は天候に依存して変動し基本的には制御できない．このため，太陽光発電が大量導入されると，制御できない発電量が増大し，需給バランスの維持が極めて困難になると予想されている．そこで，需給制御システムを高度化することにより対応する必要が生じてくる[20].

また，太陽光発電は自家消費されたあとの残りは電力網側に売電される．従来，電力は電力会社から需要家に向かって一方向に流れていたが，売電電力により，需要家から電力会社に向けて流れる逆潮流が発生する．逆潮流により配電線の電圧上昇が発生し，売電の

抑制や，家電機器への悪影響が発生する可能性がある．これは配電制御システムの高度化により対応する必要がある．

電力供給力不足については，発電量を増やす，電力消費量を減らす，自給自足する，の3 種類の対応で検討が進められている．発電量を増やすことについては，電力会社側での発電能力の増強とともに，需要家側においても，太陽光発電などの分散型電源導入加速が考えられる．

次に，電力消費量を減らすことについては，まず，需要家自身がどの程度の電力を消費しているのかの詳細を把握する必要があり，電力消費量の見える化実現が求められる．見える化実現については，現在導入が始まっている自動検針システムでの実現が期待されている．さらに，電力系統側と連携して需要家側の機器制御，例えば，ピーク電力時間帯は電気料金を高くして節電を促す間接制御や，需要家側機器の電力消費を直接抑制する直接制御などの，いわゆるデマンドレスポンスでの対応が議論されている．

自給自足については，停電により電力会社からの電力供給が途絶えても，太陽光発電や蓄電池等により電力を供給して需給バランスをとりつつ自立運転するという対応策について各所で研究開発が行われている．

(2)スマートグリッドの必須構成要素としてのセンサネットワーク

再生可能エネルギー導入拡大と電力供給力不足に起因する課題への対応策を実現するためには，需給制御システムや配電制御システムなど既存システムの機能アップや，自動検針システム，デマンドレスポンス，自立運転などの新規システムの導入が必要である．需要家側の宅内などに閉じたシステムである自立運転を除いては，地域的に広がる電力系統あるいは需要家側に設置されたローカル側機器とセンタ側に設置されるサーバ系システムが，ネットワークを介してデータのやり取りを行うことが必要になる．ここで，ローカル側機器は各機器の持つ情報をセンタ側に提供するセンサ，或いはセンタ側からの要求に応じて動作を制御するアクチュエータとしてとらえることができる．

例えば，自動検針システムを例として説明する．電力需要へのきめ細かなサービスの提供や需要家による新しい電力サービスの享受に向けて，家庭やオフィスの電気使用状況を的確に把握したいというニーズが高まっている．そのため，各家庭に設置される通信機能を持つスマートメーターと上位システム(センタ側)が双方向通信を行うことにより，定期的な検針値の収集や開閉器制御などのサービスを実現する．ここで，スマートメーターは電力使用量を計測するセンサであるとともに，開閉器制御のためのアクチュエータとみなすことができる．

尚，国内における一般家庭の需要家数は約 7,700 万件と非常に多く，各需要家に設置さ

れるスマートメーターを収容するネットワークを，如何に短期間に低コストで構築することができるかが大きな課題であった．これに対して，スマートメーターを無線センサノードとして位置づけ，ワイヤレスセンサネットワーク技術を活用することによるネットワーク構築に関わる取組みが各所で行われている[12].

2．2．2．　M2M/IoT におけるセンサネットワーク

自動車や家電などの現実世界のありとあらゆる物が人の手を介することなくネットワークにつながる M2M や全ての物をインターネットに接続する IoT の社会の到来が期待されており，各所で M2M や IoT をキーワードとした研究開発が行われている．また，M2M や IoT については，あらゆる物をネットワークを介して接続するだけでなく，集めたデータをどのように活用するのかも含めて，議論が行われている．すなわち，ネットワークに接続されるモノからのデータをどのように収集し，活用するかの検討が活発に行われており，接続されるモノからデータを集めるための広域センサネットワーク基盤や集めたデータの分析なども重要な研究テーマとなっている．

これまでは，主にパソコンやサーバ，プリンタ等の IT 関連機器が接続されていた従来のインターネットに対して， M2M やモノのインターネットと呼ばれる IoT は，センサなどの IT 関連機器以外の様々な"モノ"を接続する世界を目指している．ここで，M2M/IoT としてネットワークにつながるモノは大きく 2 つに分けられる．1 つめとして，テレビやデジタルカメラ，デジタルビデオカメラ，デジタルオーディオプレーヤー，HDD プレーヤー，DVD プレーヤー等のデジタル情報家電などがある．また，近年では，さらにデジタル化された映像，音楽，音声，写真，文字情報をインターネットを介して伝達するサービスが増えており，スマートフォンやタブレット端末もインターネットに接続され，利用されている．もう 1 つが，ヒトと密接な接点を持たない M2M と言われる領域に属する機器であり，農業用のセンサネットワークや社会インフラの監視ネットワーク，工場の監視ネットワークなどで使われている．

M2M や IoT の社会の到来においては，様々なモノ，機械，人間の行動や自然現象は膨大な情報を生成しており，これらの情報を収集して可視化することにより，様々な問題の解決が期待されている．すなわち，従来のように人間がパソコン類を使用して入力したデータ以外に，モノに取り付けられたセンサが人手を介さずにデータを入力し，インターネット経由で利用されるようになるモノのインターネット(IoT)により，センサと通信機能を持ったモノからの情報を，インターネットを介して様々な場所で活用することができるよ

うになる．

M2M や IoT を活用したソリューションとしては，エレベータ遠隔監視，自動販売機在庫管理，販売時点情報管理(POS)システム，物流配送追跡管理システムなど，既に多くのシステムが展開されている．しかしながら，従来の M2M や IoT を活用したソリューション(垂直統合型 M2M ソリューション)では，遠隔地点間をネットワークで接続し，情報管理するシステムを独自構築する必要があり，システム導入に対する障壁が大きいといった課題があった．上記に対して，システムの初期構築コストの低減や異なるシステムやアプリケーション間の相互連携の促進，アプリケーション開発の障壁低減などを実現する水平統合型 M2M やそのプラットフォーム開発等が関心を集めており，各標準化団体で検討が進められている．

図 2.1 に文献[21]で示されている M2M システムアーキテクチャを示す．M2M デバイス，M2M ゲートウェイ，M2M アプリケーションから構成されており，M2M デバイスを収容する M2M エリアネットワーク(Local area network)や M2M ゲートウェイを収容する広域ネットワークなどから構成される．また，図 2. 2 は M2M アーキテクチャモデルを示している[22]．M2M プラットフォームが接続管理機能とサービス実現機能を提供することで，複数のアプリケーションは，各種のネットワークに対して共通の API を介して M2M デバイスとつながることが可能となっている．

尚，M2M のユースケース或いは応用事例については，ETSI や One M2M などでも議論されており[23][24]，また，各所で様々な適用が示されている[25]．ここでは，代表的な事例として，"安心/安全”，"エネルギー管理”，”運輸”，"健康”，"製造業”，”シティ・オートメーション”，及び”供給とプロビジョニング”の分野(図 2.3)から幾つかの事例を抽出し，表 2.2 に応用事例の一例を示す．いずれの応用事例においても，各所に設置・取付けられたデバイスの持つ情報を集めて活用することがキーとなっており，様々なデバイスの持つ情報を，如何にして低コストで集めるかがポイントとなる．ここで，様々なデバイスが無線通信機能を持つセンサノードとして位置付けることにより，ワイヤレスセンサネットワーク技術を活用することが可能となる．尚，移動に伴うデバイスからのデータ収集については，移動を伴うデバイスのロケーション管理など，移動しないことを前提とするセンサノードに対する経路制御方式に対して，異なる課題を持つことより，本論文の対象から外している．

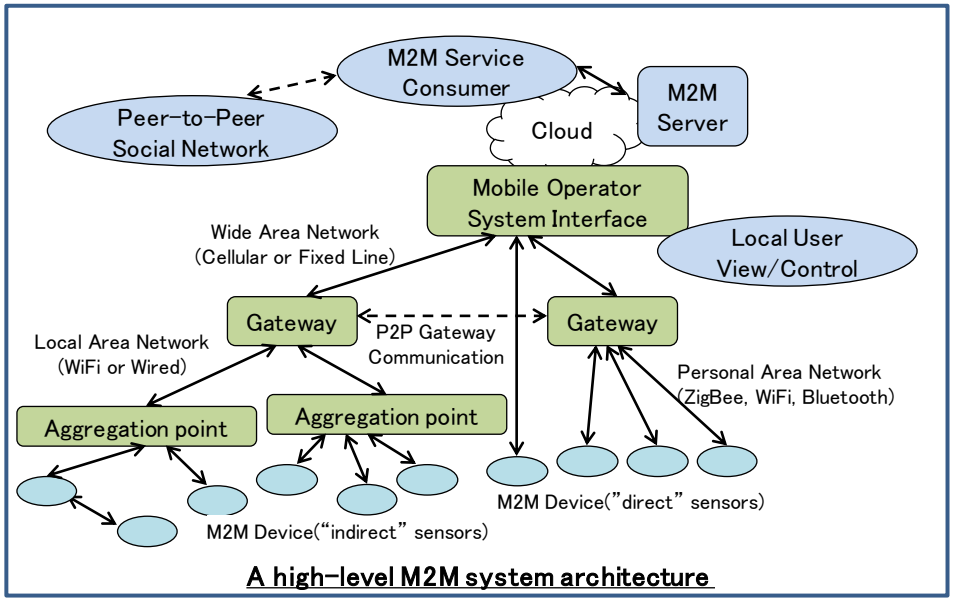


図 2.1　M2M システムアーキテクチャ(文献[21]より抜粋)

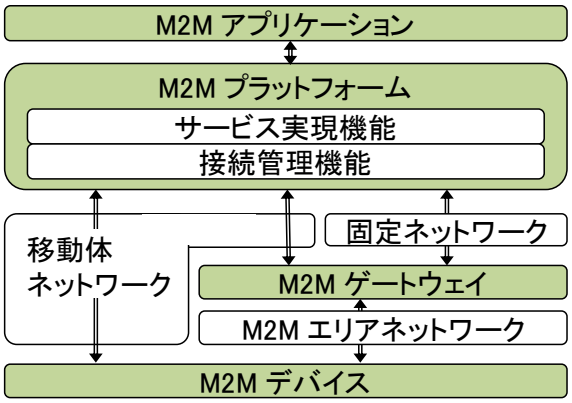


図 2.2　M2M アーキテクチャモデル(文献[22]より抜粋)

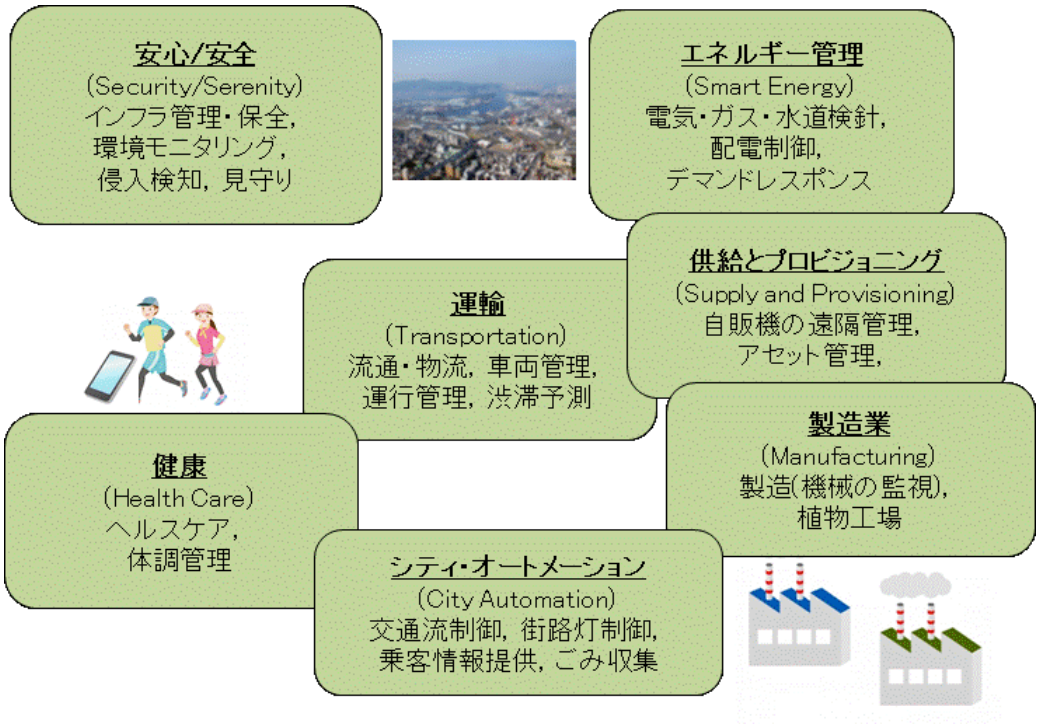


図 2.3　M2M アプリケーションの分類

表 2.2　M2M 応用事例の一例

安心/安全		
	インフラ管理・保全	道路インフラ(橋，トンネル，付帯物，法面など)や鉄道やビルなどの建造物の状態を監視する．情報としては，振動，加速度，ひずみ，変位などであり，保全のための情報取得が目的となる
	環境モニタリング	対象とするエリアに温度，湿度，エネルギー監視などのセンサを配置し，センシング情報を収集する
	侵入検知	あらかじめ敷地内に設置するセンサからのセンシング情報により，不審者の侵入を検知する．尚，カメラによる検知もある．
	見守り	小型のセンサ端末を保持する子供や高齢者の位置情報を取得することにより，見守り位置検索サービス等を提供する
エネルギー管理		
	ガス検針	ガスや水道の使用量を遠隔にて検針する．また，開閉器制御などの業務についても遠隔での実施を提供する
	水道検針	
	配電制御	配電網の個別の機器にセンサを配置し，センシング情報を取得し，各箇所の状態を監視する

運輸		
	流通・物流	顧客のモバイル端末と遠隔サーバを常時接続にて接続し，運行状況や走行位置などを管理する．また，車両内部や周囲にセンサネットワークを構築し，タイヤ圧，庫内温度，RFID 等による資産管理項目を監視する．ここで，長距離・高速通信によるインターネットアクセスには，3G/4G の携帯電話網が利用される
健康		
	ヘルスケア	血圧，体温，血糖値，心拍数，体脂肪率等の健康度チェック指標を多機能センサにより測定し，M2M 機器により集積することにより，インターネットを通して M2M アプリケーションサーバにより管理する．これにより，生活習慣病の早期発見・予防につなげる．尚，ユーザの状態変化を速やかに病院，検査機関，薬局等のネットワークへつなぐことにより，より迅速で正確なヘルスケアの実現なども検討されている． 高齢者/障害者サポートなども含む
製造業		
	製造(機械の監視)	現場に設置された各種センサ等の機器からのリアルタイムデータとビジネスインテリジェンスやマネジメントシステムといった経営ツールとを繋ぐことにより，オペレーション/メンテナンスコストの低減や顧客満足度及び生産性の向上，設備のダウンタイムの低減を目指している．予防保全や在庫管理，製造工程管理，サプライチェーン・マネジメントの高度化として議論されている
	植物工場	施設内の温度や湿度などを管理・制御し，野菜や果物を栽培する．施設内の温度・湿度・明るさなどの制御により効率化を図る
シティ・オートメーション		
	交通流制御	都市の道路や側道に設置される交通流センサからの情報に基づいて，交通流モデルを計算し，効率の良い交通流となるように，交通情報表示による交通渋滞緩和や交通量に応じた動的交差標識の表示等の制御を行う．交通量をより良く制御すること

		により，燃料消費量，大気汚染，渋滞，交通時間を削減することを目指す
	街路灯制御	各セグメントにあるローカルセンサからの情報をもとに，時間帯や他の条件(月明かりや積雪など)に応じて，街路灯の On/Off や，明るさの調整を行う．これにより，エネルギー消費を抑え，CO2 を削減する
	乗客情報提供	走行しているバス等の現在の位置情報(バス搭載の GPS，或いは路肩のチェックポイントセンサからの情報)から，各バス停において次に来るバスの到着予定時間を表示する
供給とプロビジョニング		
	自販機の遠隔管理	自販機の多機能化とサービス向上，遠隔管理・制御を実現する．絶えず，自販機の使用状況(売上，現金の状況，障害，在庫など)を監視することにより，顧客満足度の向上や設備のダウンタイムの低減を図る
	アセット管理	各アセットに対してセンサを取付け，定期的にセンシング情報を取得することにより，各アセットの状態を管理する

2．3． データ収集システム

広域なエリアに跨って設置される無線センサノードから，各々の無線センサノードが持つ情報を集めることが注目をあびている．そして前節では，スマートグリッド・スマートコミュニティや M2M/IoT を活用したソリューションを例として，ワイヤレスセンサネットワーク技術を活用したネットワーク構築の可能性，及びその期待を示した．また，スマートシティ，スマートコミュニティ，スマートグリッド，スマートウォーターなどに代表されるように，持続可能な社会の構築が求められており，消費電力，流通，交通，位置，利用履歴などの多様なデータをセンサや産業設備から収集し，それらのデータを有機的に結合し，社会基盤の効率化，或いは高度化への取組みも行われている．

このような背景のもと，本論文では，遠隔のサーバにて広域なエリアに跨って配置される無線センサノードより定期的に各無線センサノードが持つ情報を集めるとともに，各無線センサノードに対する制御も可能とするデータ収集システムを考える．ここで，本論文が想定するデータ収集システムでは，無線センサノードは，CPU 処理量やメモリ量に制約

がある固定設置された通信デバイスを想定する(図 2.4)．すなわち，図 2.4 に示すように，数百台規模のセンサ及びアクチュエータ機能を持つ無線センサノードより構築されるワイヤレスセンサネットワーク(データ収集向けワイヤレスセンサネットワーク)が，IP ネットワークを介してセンタ側システムに接続されるシステムを考える．尚，本論文では，低消費電力で長距離のカバレッジを提供する LPWA (Low Power, Wide Area)と呼ばれる無線通信も出てきているが，LLN (Low power and Lossy networks)と呼ばれる IEEE 802.15.4 で規定される無線通信を用いることを想定している．すなわち，スター型による無線ネットワークの構築では，建物の影などで無線が到達しないスポットの存在を回避することが難しく，無線マルチホップネットワーク技術により面的なエリアカバーを実現するため，IEEE 802.15.4 で規定される無線通信を採用している．

次に，データ収集システムにおけるアプリケーションで発生する通信トラヒックは以下の(1)～(3)であり，任意の無線センサノード間の通信ではなく，ワイヤレスセンサネットワークと IP ネットワークの接続点となるゲートウェイと無線センサノードによる通信が主となる．また，定期的な全ノードからのデータの一斉収集に起因するトラヒックが支配的であり，必要に応じた任意のノードからのデータ収集や個別のノードに対する情報通知は非常に限定的なトラヒックとなる．そのため，データ収集向けワイヤレスセンサネットワークは，3 章で示す無線マルチホップネットワーク技術により，ゲートウェイを根とするツリー型のネットワークが構築され，各無線センサノードからのデータは中継ノードとなる無線センサノード，及びゲートウェイを介してサーバに通知される．

(1)数十分から数時間程度の比較的長い間隔での定期的な全ノードからのデータの一斉収集

(2)必要に応じた任意のノードからのデータ収集

(3)個別のノードに対する情報通知

ここで，構築済のネットワーク維持のための経路再構築(経路メンテナンス)の実施周期(経路メンテナンス周期:Trm)は，ワイヤレスセンサネットワーク内の制御トラヒック量低減のため，定期的なデータの一斉収集の周期(データ収集周期:Tdc)に比べて十分に長く設定する(図 2.5)．例えば，データ収集周期(Tdc)が 10～30 分程度の周期に対しては，経路メンテナンス周期(Trm)は 24 時間の運用が想定され，経路メンテナンスにより再構築されたネットワークのもとで Trm/Tdc(例えば 48～144)回のデータの一斉収集が行われることになる．

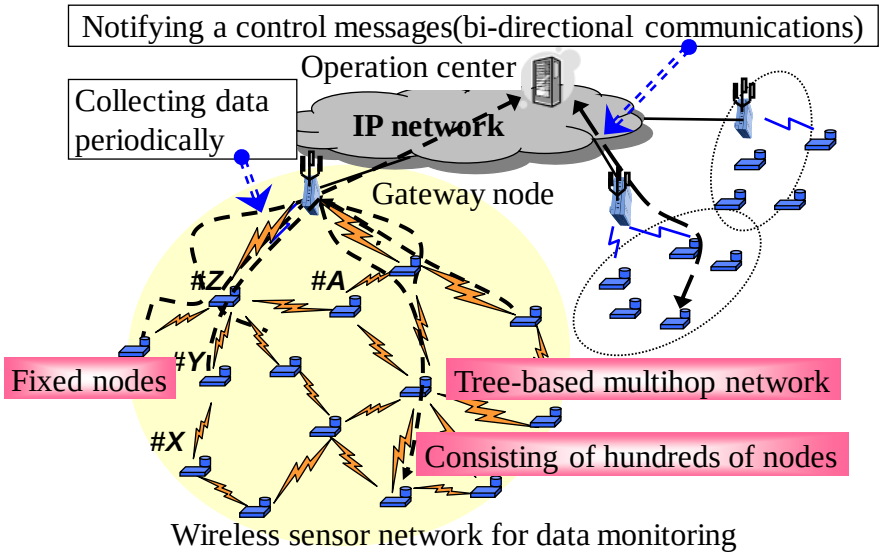


図 2.4　データ収集システム

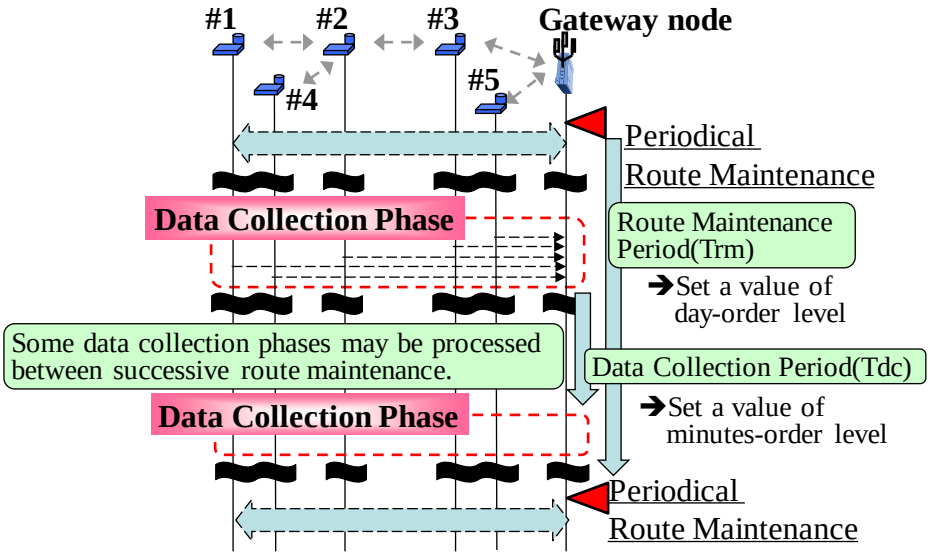


図 2.5　データ収集と経路メンテナンス

次に，データ収集システムにおける要求条件を以下に示す．対象とするデータ収集システム，特にデータ収集向けワイヤレスセンサネットワークは，数百台規模の無線センサノードより構築されており，個々の無線センサノードが各々で意味のある情報をモニタリングしている．そのため，個々の無線センサノードから確実にデータを収集する必要があるとともに，大規模化(スケーラビリティ)も重要な項目となる．

(1)確実なデータ伝送・収集

無線センサノードあたりの情報量は少ないものの，膨大な数の無線センサノードから確実に情報を収集できることが重要となる．

(2)データの機密性

無線センサノードが持つ情報は，個々の場所にリンクした情報であり，ユーザのプライバシーに係わる情報を含むことがある．そのため，不正アクセスや情報漏洩，改竄などの脅威に対して強固なセキュリティ確保が求められる．

(3)効率的なネットワークの維持・管理

情報通信インフラとして機能することが求められる．そのため，通信ネットワークの健全性を維持するための管理機能や障害発生時の迅速な復旧機能が重要となる．ここで，無線帯域は限られたリソースであるため，効率的なネットワーク制御であることが必要である．

(4)長期運用

長期に渡りデータを収集することにより，変動や傾向をつかむことが可能となる．そのため，長期にわたり安定した運用が求められる．すなわち，ワイヤレスセンサネットワークの構築に加えて，ネットワークの維持・管理においても安定して動作することが求められる．

(5)低コスト

膨大な数の無線センサノードの設置となるため，個々のセンサノードが低コストであることに加えて，通信ネットワークの維持・管理などを含めた TCO (Total Cost of Ownership)を抑えることが重要となる．

2．4．むすび

スマートグリッド・スマートコミュニティや M2M/IoT におけるネットワークにおいてワイヤレスセンサネットワークがどのように活用されるかについて概観した．また,「データを集めること」を実現する本論文で対象とするデータ収集システムについて説明するとともに，データ収集システムに求められる要求条件を明らかにした．次章以降で，データ収集システムを実現するためのワイヤレスセンサネットワーク技術を説明するとともに，要求条件に基づく検討課題への対応を述べる．

第3章　ワイヤレスセンサネットワークに向けた経路制御方式の課題

3．1．まえがき

通信距離が数十 m～百 m 程度の低消費電力型の無線通信技術を用いて，広域に跨って配置される無線センサノード同士が自律的にネットワークを構築するためには，無線マルチホップネットワーク技術と呼ばれる経路制御方式が必要となる．これまで，無線端末間で自律的にネットワークを構築するための経路制御方式については，アドホックネットワーク或いはマルチホップネットワーク，メッシュネットワークなどの枠組みで研究開発が行われてきており，ワイヤレスセンサネットワークにおいても，アドホックネットワークやマルチホップネットワーク，メッシュネットワークで提案される経路制御方式[2]の適用が議論されている．ここで，本論文ではアドホックネットワーク或いはマルチホップネットワーク，メッシュネットワークを実現するための経路制御方式を総称して無線マルチホップネットワーク技術と呼んでいる．

本章では，無線マルチホップネットワーク技術として議論されてきた経路制御方式を振り返るとともに，モバイルアドホックネットワークからワイヤレスセンサネットワークに向けた経路制御方式の変遷，ワイヤレスセンサネットワークへの適用を視野に入れて策定された RPL (IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy networks)の概要，及び従来からの経路制御方式や RPL を大規模なワイヤレスセンサネットワークの構築に適用する際の課題を説明する．

3．2．無線マルチホップネットワーク技術

アドホックネットワーク，及びマルチホップネットワーク，メッシュネットワークは，無線端末が基地局やアクセスポイントと通信を行うことにより無線ネットワークを構築する携帯電話網や無線 LAN に対して，基地局やアクセスポイントなどの通信インフラを必

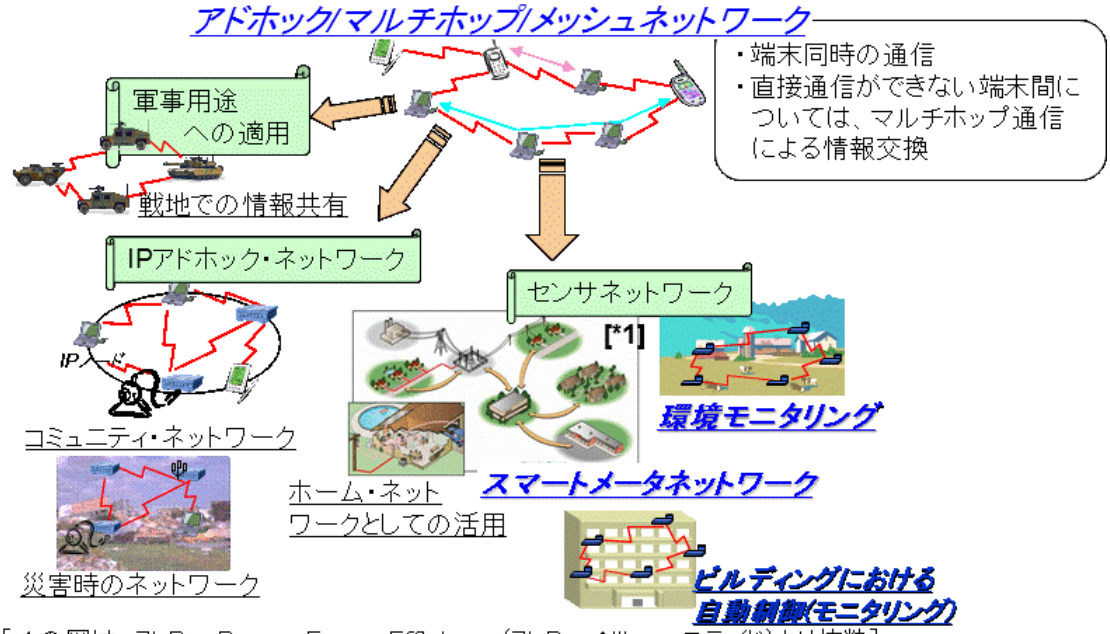
要とせず，無線端末間で無線ネットワークを構築するネットワークである．尚，経路制御方式の議論の観点からは，アドホックネットワーク，マルチホップネットワーク，メッシュネットワークは同義に使われることが多く，本論文でも同義で扱っている．ここで，アドホックネットワークは，何時でも，何処でも，その場での，持ち寄った無線端末により，既存の無線通信インフラなしに無線ネットワークを構築することを目指しており，ユビキタスシステムのネットワークプラットフォームとして期待された．そのため，アドホックネットワークは，様々なユースケースを想定して研究開発が行われてきた(図 3.1)．例えば，米国の国防関係においては，1970 年代の古くから戦場でのネットワークとして研究が行われてきており，戦地での情報共有やモビリティサービスの実現などに向けて様々な経路制御方式が提案されている．

また，インターネット技術の標準化を議論する IETF (Internet Engineering Task Force) でも，1997 年に MANET (Mobile Adhoc Network) WG (Working Group)が発足し，移動端末をも含めたアドホックネットワークを形成するための経路制御方式を中心に議論が行われてきた．そして，インターネット技術に基づくアドホックネットワーク技術を活用したアプリケーションとしては，教室や講演会場での資料の配布や共同作業支援に向けたコミュニティネットワークへの展開やホームネットワークとしての活用，災害時等における一時的な通信インフラとしての活用などが期待されてきた．特に，国内においては，産学官の連携により，広域・大規模アドホックネットワークの研究・開発を推進し，ユビキタス情報通信環境やアプリケーションの実現に資するアドホックネットワーク・プラットフォームを実現することを目的として，2003 年にアドホックネットワーク・プラットフォームに関するコンソーシアムが設立され，IETF MANET WG で策定された経路制御方式を用いた 100 台規模での大規模実証[26]やアドホックネットワーク技術の活用に向けた取組みが行われた[27][28][29]．

さらに近年では，M2M や IoT をキーワードとして，データ収集に対する関心が高まっており，環境モニタリングなどワイヤレスセンサネットワークへの適用も議論されている．例えば，[8]ではビル管理や工場などの設備管理，エネルギー管理・監視，在庫管理などへの適用に向けた課題が示されている．[30]においても電力向けユーティリティネットワークにおける主に設備監視への適用に向けた議論が行われている．[31]では，インターネットプロトコルを前提としてスマートグリッドに向けた自動検針システムを構築する際の要求条件を整理しており，アプリケーションとして ANSI C12.22 及び SIP を採用する際の比較を行っている．

このように，アドホックネットワークやマルチホップネットワーク，メッシュネットワークについては，通信インフラを必要とせず無線端末間でネットワークを構築できること

から，様々な用途への適用に向け各種の経路制御方式が提案されている[32][33]．特に，移動端末(移動ノード)も含めて対象とするアドホックネットワークにおいては，無線端末の移動に伴うトポロジーのダイナミックな変化に対応した経路制御方式が提案されており，目的や用途に応じた適用が必要となる．



[*1の図は、ZigBee Powers Energy Efficiency(ZigBee Allianceスライド)より抜粋]

図 3.1　アドホックネットワークの適用例

次に，代表的なアドホックネットワークに関する経路制御方式について説明する．アドホックネットワークの代表的な経路制御方式としては，On-demand 型(Reactive 型)に分類される AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector)[34]や DSR (Dynamic Source Routing)[35]，DYMO (Dynamic MANET On-Demand)[36]といった経路制御方式や Proactive 型に分類される OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)[37]などがあり，また，大規模なネットワーク実現に向けた階層型プロトコルである HSR (hybrid source routing)[38]や位置情報を利用した位置情報利用型プロトコルである LAR (Location-Aided Routing)[39]などがある(図 3.2).

On-demand 型の経路制御方式は，各無線ノードがデータ転送の開始時に送信先ノードに対する経路を確立する方式であり，一般に，「フラッディング」と呼ばれる手法により，送信先ノードに対する経路探索を実施する．このフラッディングに基づく経路探索では，ネットワーク内の全無線ノードに制御情報を伝搬する必要があり，スケーラビリティの確保が大きな課題となる．また，データ転送の開始時に経路を探索するため，経路確立のための遅延が発生する，或いはデータ転送が頻繁に行われる時などでは経路探索のためのオーバヘッドが増大するといった課題がある．

Proactive 型の経路制御方式は，近接ノードとの間で定期的にメッセージを交換し，自身の持つ経路情報を更新する方式であり，ネットワークを構成する全ノードに対する経路を常時，保持している．また，経路情報のメンテナンスのため，定期的にメッセージを交換する必要があり，制御トラヒック量が増える傾向にある．そのため，中規模で，ノード密度が高い環境で有効と言われており，個々の無線ノードにおいて必要となるメモリ量の増大や経路情報のメンテナンスに伴うトラヒック量の増大が課題となる．

階層型プロトコルは，On-demand 型と Proactive 型のプロトコルを組み合わせた方式である．この方式では，ネットワークを階層化することにより，近隣の無線ノードとの通信に対しては Proactive 型を，階層間の通信に対しては On-demand 型を適用することにより，各プロトコルの短所を補っている．しかしながら，ネットワークの階層化とその管理のため，無線ノードの新規設置や故障などによる離脱により，その都度，ネットワークの階層化・管理を見直す必要があり，継続した運用の面から運用コストが増大するといった課題がある．

位置情報利用型プロトコルは，無線ノードの位置情報を利用する方式である．この方式では，GPS 等による位置情報の取得が必要であり，低コストが要求されるセンサネットワークでは，各無線ノードの位置情報を取得するためのコストが増大するといった課題がある．

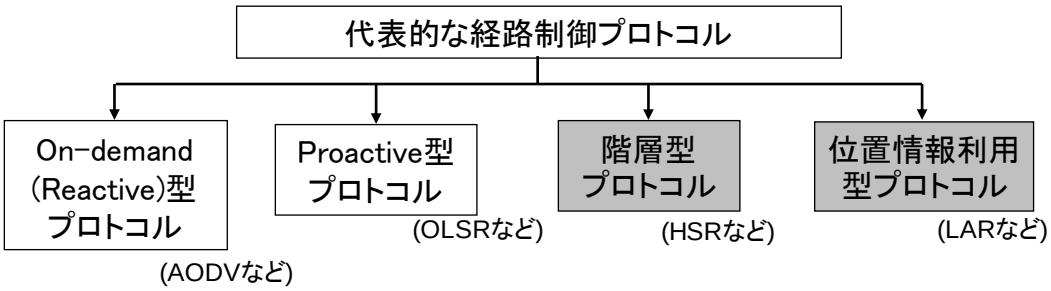


図 3.2 アドホックネットワークに関わる経路制御プロトコルの分類

3．3． ワイヤレスセンサネットワークへの適用に向けた経路制御方式

前節で述べたように，無線マルチホップネットワーク技術については，古くから，車やハンドヘルド端末などの移動端末或いはノート PC や PDA などの小型無線端末からなる

ネットワークの実現に向けて，研究開発が行われてきた．しかしながら，ワイヤレスセンサネットワークを構築する無線センサノードは，CPU 処理能力やメモリ量などに大きな制約があること，及び静的な(移動しない)端末であることなどより，従来からの IETF MANET WG などを中心に議論されてきた経路制御方式をもとにした議論では，課題が多く新たなアプローチが必要であると言われるようになった．すなわち，制御パケットのばら撒き(フラッディング)を基本とするフラッディング型(Flooding-based)且つ階層化による経路制御方式から，”Self-organizing coordinated-based”と呼ばれる経路制御方式に関心が移行してきている[40].

尚，従来からのアドホックネットワークにおける議論と昨今のワイヤレスセンサネットワークを対象にした議論では，(1)対象とするアプリケーション，(2)ネットワーク構築の制御スキーム，(3)通信トラヒックの特性，(4)無線リンクの特性，(5)無線ノードの特性，及び(6)動作時間について以下のような異なる要求が存在する．

(1)対象とするアプリケーション

ワイヤレスセンサネットワークのアプリケーションは，転送されるデータサイズが小さく低遅延が求められる産業分野におけるモニタリングから，通常時はパケット損に対して再送制御で対応可能であるが，緊急時には低遅延での転送が求められる広域なエリアに跨る環境モニタリングまで，多様なアプリケーションが想定されており，アプリケーションに応じた要求条件が存在する．

(2)ネットワーク構築の制御スキーム

従来からのアドホックネットワークにおいては，一般にネットワークの制御は分散型である．分散型の経路制御方式は，ネットワークトポロジーの変化に対して局所的に対応可能であることなどより，一般に集中型の経路制御方式よりも，経路制御に関わる通信トラヒック量が少なく、効率的であると言われている．しかしながら，ワイヤレスセンサネットワークにおいては，データに関わる通信トラヒックは少なく，分散型の経路制御方式の制御に関わる通信トラヒックが無線帯域を占める割合が大きくなる傾向にある．

(3)通信トラヒックの特性

ワイヤレスセンサネットワークにおいては，流れるデータは非常に少ないが，各センサノードから特定の複数のノードに向けた通信となる傾向にあり，特定ノードにおける通信トラヒック量は増大する．また，センサノード間による通信は存在しない，或いは稀な場合がほとんどである．

(4)無線リンクの特性

ワイヤレスセンサネットワークにおける無線リンクは，無線伝搬状況が変動しやすい

LLN (Low power and Lossy networks)と呼ばれる不安定な無線環境となる．そのため，無線 LAN などに比べてパケットエラーがバースト的に発生する可能性が高い．また，小電力であることより無線帯域についても制約があり，ネットワーク層より上位層において，ネットワークの安定性を実現するメカニズムが求められる．

(5)無線ノードの特性

ワイヤレスセンサネットワークを構成する無線センサノードは，アドホックネットワークなどで議論される無線端末に比べて，CPU 処理能力やメモリ量に大きな制約がある．また，ワイヤレスセンサネットワークにおいては，バッテリ駆動が求められることが多く，低消費電力での動作，及び低消費電力に向けた経路制御方式が求められる．さらに，ワイヤレスセンサネットワークについては，そのネットワークを構成する無線ノードの数はアドホックネットワークに比べて多くなる．

(6)動作時間

ワイヤレスセンサネットワークにおいては，そのアプリケーションは数年から十年の駆動時間が求められる．

このように，従来からのアドホックネットワークとワイヤレスセンサネットワークでは大きな相違があり，ワイヤレスセンサネットワークの普及に向けた大きな障害となってきた．すなわち，低コスト CPU への組込み，及び信頼性且つ効率性を要求する通信を実現しつつ，ネットワークのライフタイムの延長を実現する低消費電力化のソリューションが求められる. 上記背景のもと, IETF ROLL (Routing Over Low power and Lossy networks) WG が設立され，ワイヤレスセンサネットワークに対して 4 つのアプリケーション例を示すとともに，IETF MANET WG で議論されてきた経路制御方式では，ワイヤレスセンサネットワークにおけるアプリケーションの要求条件を満たすことが出来ないことを示した. そして，ワイヤレスセンサネットワークにおける要求条件を幅広く満たすように，単位時間毎に無線特性が変動するような不安定な無線環境の中で，少量のメモリリソースと低速 CPU からなる無線センサノードでも動作可能な経路制御方式として，RPL (IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy networks)を策定した[41].

3．4． RPL

ここでは，IETF ROLL WG が策定した RPL の概要を示す.

RPL は各無線ノードが特定ノード(ゲートウェイ)にデータを送信するアプリケーションを想定しており，ゲートウェイを根とするツリー構造のネットワークを構築する経路制御方式となっている．すなわち，上り方向(各無線ノードからゲートウェイへの転送)の経路の学習を主に考えることにより，使用メモリ量の低減や制御トラヒック量の削減を図っている．尚，下り方向(ゲートウェイから各無線ノードに対する通信)の経路については，必要に応じて経路の確保を行っており，ホップ-バイ-ホップ(Hop-by-Hop)による転送(Storing mode)とソースルーティング(Source routing)による転送(Non-storing mode)の 2 つの動作モードを規定している．ここで，ソースルーティング(Source routing)により転送を行う動作モード(Non-storing mode)では，ゲートウェイが収容する無線ノード宛の全ての経路を管理しており，中継ノードにおける使用メモリ量の削減が可能である．

以下に RPL の主要技術項目である(1)DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph)の形成(上り方向の経路の学習)，(2)下り方向の経路の確保，及び(3)Trickle タイマの概要を示す．

(1)DODAG の形成(上り方向の経路の学習)

図 3.3 に上り方向の経路の学習に対する概念図を示す．ゲートウェイは定期的に広告メッセージ(DIO：DODAG Information Object)をネットワーク内にフラッディング(ばら撒き)を行っている．各無線ノードは上記広告メッセージ(DIO)を受信することにより，ゲートウェイに向けた経路を学習すると共に，受信した広告メッセージ(DIO)を転送する．ここで，各無線ノードは，上位ノードからのランク値(ホップ数や無線電波受信強度などを基に算出)をもとに，ゲートウェイに向けた経路として自ノードの Parent ノードを選択する．

(2)下り方向の経路の確保

図 3.4 に下り方向の経路の確保に対する概念図を示す．ゲートウェイやゲートウェイを介して外部のネットワークからの通信を必要とする無線ノードは，経路構築メッセージ（DAO: Destination Advertisement Object)を上り方向の経路を用いてゲートウェイに通知する．ここで，Storing mode 時は，中継ノードが経路構築メッセージ(DAO)の送信元に対する経路を学習することにより，また，Non-storing mode 時は，中継ノードが経路構築メッセージ(DAO)に経路履歴，或いは送信元ノードが隣接ノードに関する情報を追加することにより，下り方向の経路を確保する．

(3)Trickle タイマ

RPL では不要な制御メッセージの送信を抑制するためのメカニズムとして Trickle タイ

マ(或は Trickle アルゴリズム)を導入している．この Trickle アルゴリズムでは，ネットワークが正常に動作している，すなわち，ネットワーク状況に変化が無い時は，極力，制御メッセージの送信を抑制するために，制御メッセージである広告メッセージ(DIO)の送信間隔を自動的に長くしている．尚，ネットワークの状況に変化があった際には，最も短い時間間隔にて制御メッセージである広告メッセージ(DIO)を送信することにより，ネットワーク状況の変化に追従する．

図 3.5 を用いて，広告メッセージ(DIO)の送信タイミング制御について説明する．最初に，ネットワーク状況に変化が無い時は，広告メッセージ(DIO)の送信間隔を自動的に伸長する．すなわち，まず規定時間を定め，その規定時間以内に広告メッセージ(DIO)を発信するように設定し(図 3.5 の①)，自身が広告メッセージ(DIO)を発信する前に，規定回数以上の広告メッセージ(DIO)を受信時，発信を抑制する(図 3.5 の②～④)．そして，規定時間を超過時，先に設定した規定時間よりも長い新たな規定時間を設定する(図 3.5 の⑤)．一方，自身の状況に変化があった時，設定した時間を無視して，広告メッセージ(DIO)を発信する(図 3.5 の⑥)．

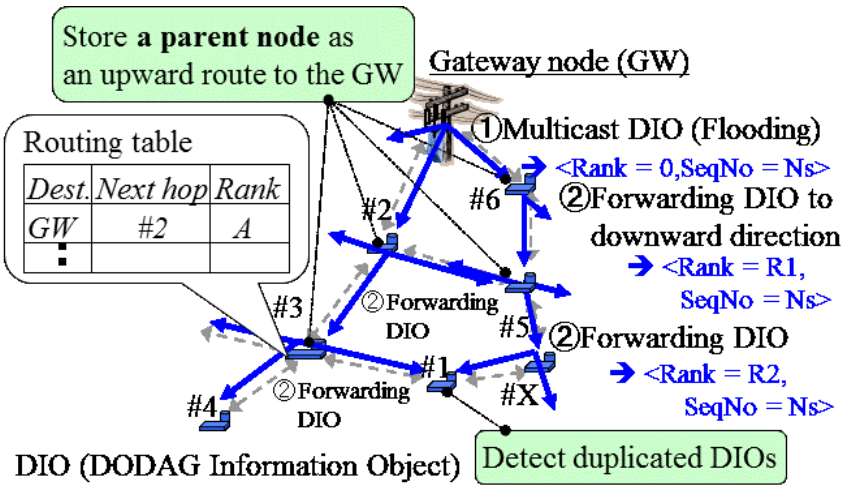


図 3.3 DODAG の形成(上り方向の経路の学習)

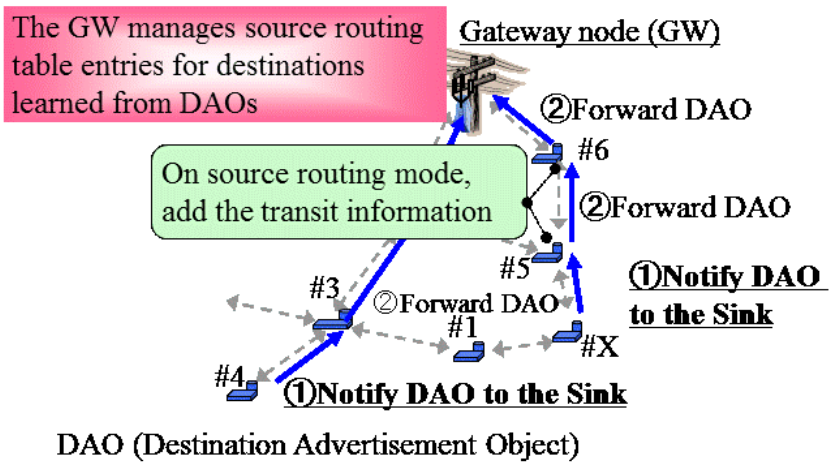


図 3.4　下り方向の経路の確保

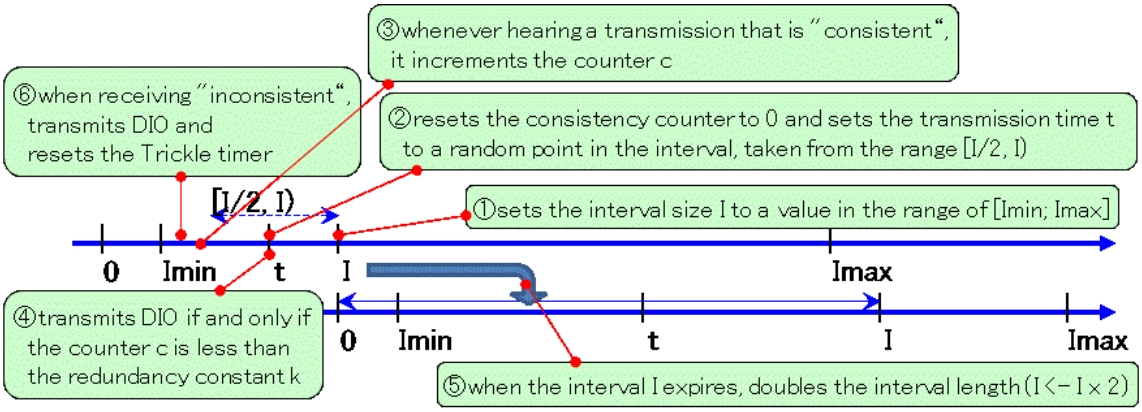


図 3.5　Trickle アルゴリズム

3．5．無線マルチホップネットワーク技術の課題

前節までで述べたように，従来からアドホックネットワークやマルチホップネットワーク，メッシュネットワークに関しては様々な経路制御方式の研究開発が行われてきている．また，ワイヤレスセンサネットワークへの適用を目的として，IETF ROLL WG では RPL に関わる議論が行われている．しかしながら，アドホックネットワークやマルチホップネットワーク，メッシュネットワーク，ワイヤレスセンサネットワークについては，時空間的に通信品質が変動する通信媒体を用いて通信すること，及び自律分散により各ノードが自身の持つ情報に従い経路を構築することより，以下の課題がある．

(1)自律分散による経路構築に伴う経路の不平衡性

(2)無線環境の変動に伴う一時的なパケット損の発生

(3)ゲートウェイ近傍ノードにおける経路の集中

(4)複数回の転送に伴う End-to-End における伝送品質の低下

(5)ネットワーク上でのパケット衝突に伴うパケット損

さらに，M2M/IoT におけるデータ収集システムのアプリケーションの観点から，確実にデータを集めるための経路の安定性や緊急性を要するパケットの転送，周辺環境の評価や異なる CPU 処理能力やメモリ量を持つ多様な無線センサノードからなるワイヤレスセンサネットワークの構築などの課題もある．

ここでは，(1)～(5)に関わる課題について述べる．尚，M2M/IoT におけるデータ収集システムのアプリケーションの観点からの課題については，4 章以降の頑強なワイヤレスセンサネットワーク構築に向けた研究開発の中で述べる．

(1)自律分散による経路構築に伴う経路の不平衡性

多数の無線センサノードからなるワイヤレスセンサネットワークでは，一般には送信元ノードと送信先ノード間の経路は，評価メトリックが最小となるように自律分散により経路を決定する．そのため，ツリー型のネットワークでは，各無線ノードを経由するゲートウェイとの通信に関わる経路数に対して，無線ノード間での偏りが発生することが知られている．例えば，図 3.6(a)は経路の偏りを示す一例であり，各無線ノードが一様に分布している時においても，ゲートウェイからの距離が同じホップ数である無線ノード間で，各ノードを通過する経路に偏りが発生する例を示している．ここで，括弧内の値は，各ノードを通過する経路数を示している．図 3.6(a)では，各無線ノードがゲートウェイまでのホップ数を最小化するように経路を選択しており，無線ノード#A 及び#D は無線ノード#C よりもゲートウェイの近傍に位置するため，無線ノード#C に比べて経路数が少なくなっている．これは，図 3.7 に示すように，無線ノード#A に接続可能な領域の大部分がゲートウェイや無線ノード#C に接続可能な領域と重複することにより，無線ノード#A を介した経路を必要とする無線ノード数が少なくなることによる．尚，経路の公平性を考慮することにより，図 3.6(b)のように構成することも可能である．

同様に，図 3.8 はネットワーク内の無線ノードの分布に偏りがある時の例を示しており，各ノードが自律的に経路を選択することにより，図 3.6(a)と同様に偏りが発生している．すなわち，ゲートウェイの左側にノードが集中しているため，無線ノード#B に経路が集中している．

ここで，ノード毎に通過する経路に偏りがある場合，無線リンクや無線ノードの障害により影響を受けるノード数に偏りが生じる．すなわち，無線リンクや無線ノードの故障に

伴い，故障箇所を経由する全てのノードからのゲートウェイ宛のパケットがゲートウェイまで転送されることは出来ず，経路の再構築，或いはアプリケーションでの対応が必要となる．図 3.6(a)の例では，無線ノード#C の故障によるネットワーク再構築のためのオーバヘッドが，ゲートウェイから論理的に同じ距離に位置する無線ノード#A の故障時に比べて格段に大きくなる．

このように，各無線ノードが自律分散的に経路を選択し，ネットワークを構築する場合，ゲートウェイと各無線ノード間の経路が公平に分散されないといった課題があり，経路の最適化に向けて集中制御の概念を導入することも一つの候補である．

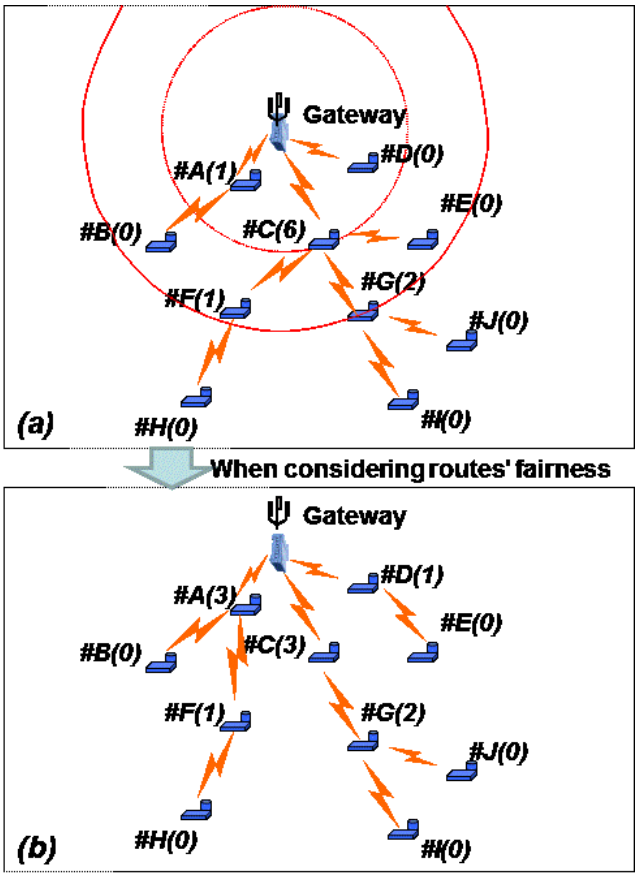


図 3.6 ワイヤレスセンサネットワークにおける経路公平性

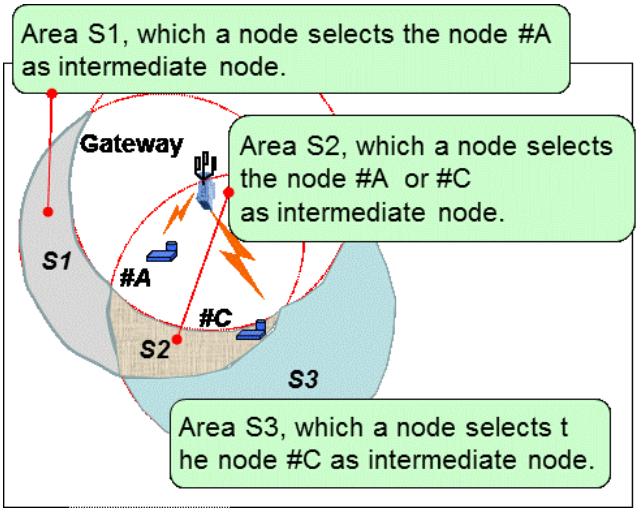


図 3.7　経路不公平性の要因例

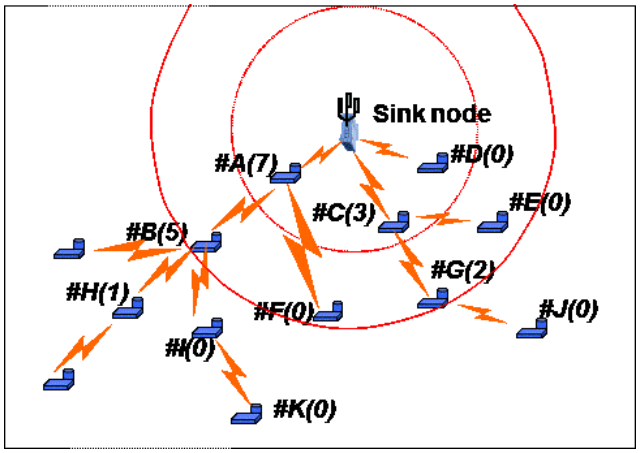


図 3.8　無線ノードの分布に偏りがある WSN における経路公平性

(2)無線環境の変動に伴う一時的なパケット損の発生

無線 LAN，或いは LLN (Low-power and Lossy Network)と呼ばれる IEEE 802.15.4 を用いた無線通信では，時空間的に無線環境が変動することが知られている．図 3.9([42]からの抜粋)は，無線リンクの変動を示した一例であり，受信ノードにおける受信信号強度(Received Signal Strength Indication: RSSI)を示している．時間と共に受信信号強度が大きく変動していることがわかる．また，無線通信では，人や物の移動に伴うマルチパスフェージングなどの影響によりバースト的なパケット損の発生も知られている．このように，無線リンクの時空間的な変動や人や物の移動に伴うパケット損の発生により，無線ノードが固定して設置されている環境においても，直前の通信ではパケットの転送に成功していたノード間においても，一時的に通信に失敗する，すなわち，パケットの転送に失敗する現象が発生する(図 3.10)．

このような現象に対して，下位層から得られる受信信号強度やノード間における送受信パケットの通信成功確率(例えば[43]など)などをもとに，ネットワーク層が最適と思われる隣接ノード及び経路を選択する研究も行われている．しかしながら，無線環境の変動を予知することは難しく，ネットワーク層より上位に位置する上位層との連携が重要となる．

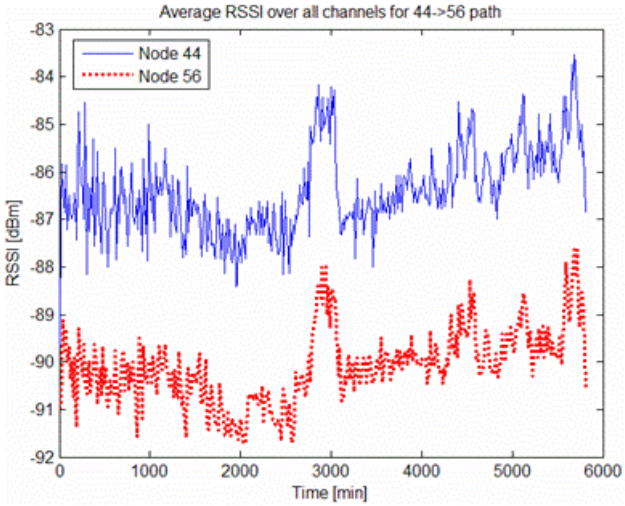


図 3.9　無線リンク変動の一例

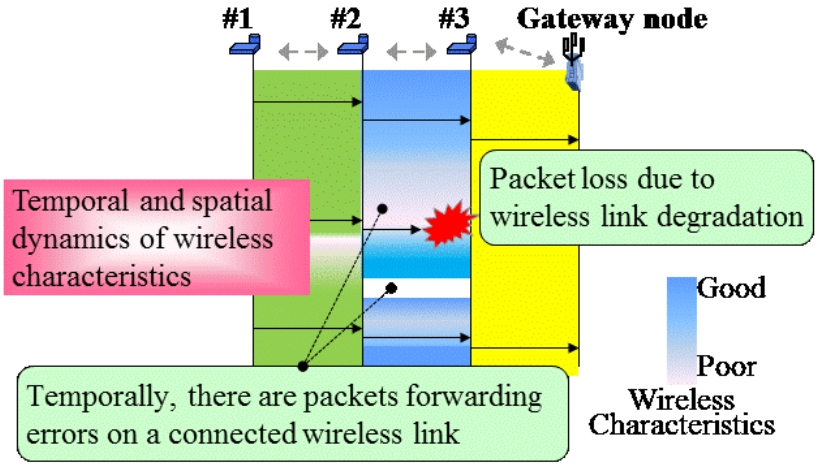


図 3.10　時空間的な無線特性の変動

(3)ゲートウェイ近傍ノードにおける経路の集中

データ収集システムなどでは，ゲートウェイを送信元或いは送信先とする通信，すなわち，各ノードからのモニタリング・データの通知や各ノードに対するアクチュエーション及び制御情報の通知が主となる．そのため，ゲートウェイを根とするツリー構造のネットワークが構築され，ゲートウェイやその近傍に位置するノードが必要とする経路情報量が増大する(図 3.11)．

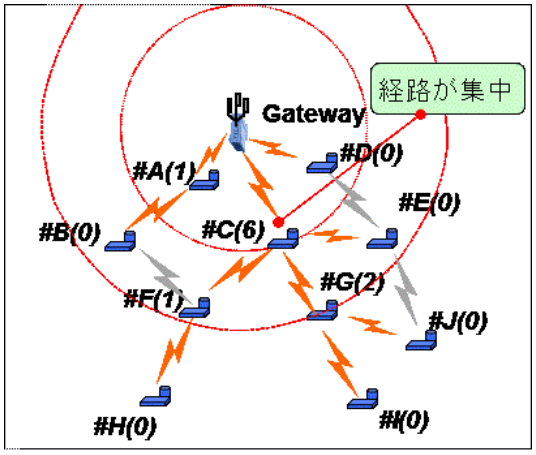


図 3.11　センサネットワークにおけるゲートウェイ近傍における経路の集中

(4)複数回の転送に伴う End-to-End における伝送品質の低下

無線リンクは，有線リンクに比べて高いパケットエラー率であり，無線環境は時空間的に変動している．アドホックネットワーク，或いはマルチホップネットワーク，メッシュネットワーク，ワイヤレスセンサネットワークでは，既存の通信インフラを活用することなく，無線ノード間による自律的なネットワークを構築している．このネットワークでは，無線のカバーエリアの制限を補うために，数珠つなぎのネットワークが構築されており，一般に送信元から送信先まで複数回のパケットの転送が行われる．そのため，パケットが送信元から送信先まで転送される確率であるパケットの到達率が有線ネットワークに比べて低下することが知られている．複数回の転送に伴うパケット損などの伝送品質の低下をどのように補うかは大きな課題であり，アプリケーションにおけるパケットの再送や受信すべきデータを受け取っていないアプリケーションにおけるデータの再取得による補完処理など，ネットワーク層より上位に位置する上位層との連携が重要となる．

(5)ネットワーク上でのパケット衝突に伴うパケット損

無線ネットワークにおいては，隠れ端末問題などによるパケット衝突の考慮が必要である．特に，ゲートウェイによる各無線ノードが持つデータの収集や各無線ノードに対するアクチュエーション及び制御情報の通知が主となるデータ収集システムでは，ゲートウェイを根とするツリー型のネットワークが構築されており，ゲートウェイやその近傍に位置する無線ノードにトラヒックが集中する傾向がある．そのため，ゲートウェイやその近傍では隠れ端末問題などによりパケットの衝突発生確率が増大する(図 3.12)．定期的なデータ収集などについては，アプリケーションとの連携により，無線上でのパケットの競合を極力抑えるような工夫も重要となる．

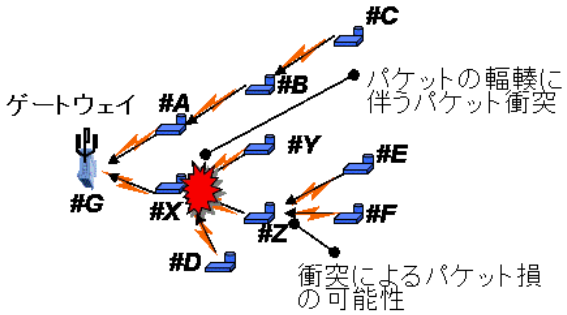


図 3.12　センサネットワークにおけるパケット衝突

3．6．むすび

無線マルチホップネットワーク技術を活用したアドホックネットワーク或いはマルチホップネットワーク，メッシュネットワーク，ワイヤレスセンサネットワークについては，その実現に向けた経路制御方式を中心に古くから数多くの研究が行われてきた．特に近年では，ワイヤレスセンサネットワークを活用したアプリケーションの持つ特性に着目し，従来からの経路制御方式に対して，低コスト CPU への組込みや無線帯域の有効利用，低消費電力化を目指して，省電力で不安定な通信環境下で動作する経路制御方式として RPL が活発に議論されている．本章では，無線マルチホップネットワーク技術に関わる研究動向を紹介した．しかしながら，ネットワーク稼働時に生じる無線リンクの特性変動などによる影響を考慮した検討や，無線センサノードの CPU やメモリ量などのリソースの制約を考慮した検討は少ない．また，アプリケーションから見たネットワークの安定性に向けた検討も残されている．

第4章　ワイヤレスセンサネットワークにおけるネットワーク安定性向上のための経路メンテナンス手法

4．1．まえがき

前章までで，データ収集向けワイヤレスセンサネットワークの構築に向けた研究開発の背景や関連する無線マルチホップネットワーク技術に関わる動向について説明した．本章では，確実に且つ安定してデータを収集するための頑強なデータ収集向けワイヤレスセンサネットワークの構築に向けた提案を行う．

ワイヤレスセンサネットワークを構築するための無線マルチホップネットワーク技術については，前章で説明したように従来から多くの経路制御方式が存在しており，任意のノード間での通信を前提として，パケット到達率や主なる経路の経路存続時間などにより経路の安定性が議論されてきた．しかしながら，本論文でターゲットとするデータ収集システムは，従来からの議論に対して，ゲートウェイを根とするツリー型のネットワークであること，各経路がゲートウェイ近傍のノードより順次に構築されること，及びデータの存在期間が限定的であることなどの差異がある．そのため，従来の主なる経路の存続時間などとは異なる指標での評価が必要である．

また，データ収集の観点からは，従来からのパケット到達率や経路の安定性の評価に加えて，確実にデータを集めることが求められる．そのため，本論文で想定するデータ収集システムでは，データ収集に対して，無線リンク障害などによりセンサノードからのデータがゲートウェイに到達しない場合，ゲートウェイは，データが到達していないノードに対して逐次にデータの再収集を行い，確実にデータの収集を行う．これにより，無線リンク障害による経路途中でのパケット損は，データの再収集によるパケット数増大や全ノードからのデータ収集完了までに要する時間増大の要因となる．そのため，各ノードからゲートウェイへのデータの到達に関して，無線リンク障害の発生による影響を抑えるため，経路が集中するノードに対して経路を分散させることが望まれる．

そこで本章では，各無線ノードとゲートウェイ間の通信に対して，無線リンク障害によ

る影響を評価する新たな指標として，「無線リンク障害発生時のデータ到達率」を導入し，安定したデータ収集の観点からネットワーク安定性向上に向けた経路メンテナンス手法を提案する[4].

4．2． ネットワーク安定性に関わる課題

従来の経路制御方式では，隣接ノードからの情報のみにより経路を構築するため，経路選択時においては，経路或はネットワークの接続安定性や持続性を十分に考慮した経路の選択が行われていない．また，本論文で想定する LLN (Low-power and Lossy Network) と呼ばれる IEEE 802.15.4 に代表される無線通信では，時空間的な無線環境の変動などによる一時的なノード間の無線伝搬状況の悪化やバースト的なパケットエラーの発生が知られている(3．5．の図 3.10 を参照)．そのため，最初に決定された最適経路が時間の経過とともに最適ではなくなる，すなわち，他の経路が最適経路となることが知られている．この無線通信特性のダイナミック性に起因する一時的な無線特性の劣化が発生するタイミング及びロケーションの予測は困難である．例えば，[44]や[45]ではテストベッドにおける実環境にて，定期的に経路の再構築を行うことにより，最適無線経路の変動を観測しており，Route Prevalence や Route Persistence，Route Oscillation の評価メトリックを用いて時間的に最適無線経路が変動することを示している．一方，[46]では，一時的な輻輳による転送失敗や物理的な特性劣化による転送失敗により無線リンクのエラーが発生する無線ネットワークに対して，無線リンクの切断による影響軽減の面から，より耐性のある無線リンクを選択するメカニズムを提案しており，平均スループットや平均遅延の向上を示している．しかしながら，無線リンクの切断が生じた際のデータ到達率への影響については議論されていない．すなわち，データ収集に関わる遅延の分散を考慮した議論も重要となる．さらに，無線センサノードでは，限られたメモリリソースの制約により，隣接する無線ノードとのパケットエラー率などの無線リンクの特性の管理が困難であるといった課題もある．

また，[47]では，ツリー型ネットワークにおいて，中継ノードにおける Parent ノードの変更による影響(Domino effect)を示しており，隣接ノードの接続履歴(Neighbor history)に基づく安定した無線リンク選択の手法を示している．しかしながら，無線センサノードへの適用に向けては，メモリリソースの制約により隣接ノードの接続履歴(Neighbor history)の実装が困難であるといった課題がある．

ここで，安定したデータ収集を実現するためには，無線環境の変動による影響を均一化，すなわち，偏りのないツリー型のネットワークを構築することが重要となる．言い換えれば，データ収集のアプリケーションの観点から見れば，各無線ノードよりゲートウェイへデータが到達する平均確率だけでなく，データが到達する確率の分散も重要となる．

さらに，本論文がターゲットとするデータ収集システムでは，常にネットワーク上にデータが存在するのではなく，特定の時間帯にのみ無線ノードからゲートウェイに向けてデータが送信される．また，限られた無線リソース(無線帯域)を有効に利用するため，定期的な制御パケットの送信に基づく隣接ノードに対する健全性確認ではなく，データパケットの転送と連携した隣接ノードへの到達性確認を前提としている．そのため，[44]や[45]で示されるような，主なる経路に対する Route Prevalence，Route Persistence，及び Route Oscillation による経路の安定性評価は適当ではなく，一時的な無線環境の劣化と該当無線リンクを介したパケットの転送が競合する際の転送パケットの損失による影響度の評価が重要となる．

このように，従来からの自律分散型による経路制御方式では，データ収集の観点からの無線通信特性のダイナミック性への考慮が不十分であり，一時的な無線環境の劣化と該当無線リンクを介したパケットの転送が重なる際には，各無線ノードからゲートウェイへのデータの到達率が大きく低下する，及びロケーションによる変動が大きいといった課題がある．例えば，図 4.1 に示すように，時空間的な無線環境の変動により一時的なノード間の無線伝搬状態の劣化が幾つかの無線リンクで発生しうる．ここで，一時的な無線リンクの劣化がデータ収集のタイミングと重ならない時には，データ収集への影響は見られない．しかしながら，データ収集のタイミングと無線リンクの一時的な劣化が重なる時には，無線リンクの無線伝搬状態が一時的に劣化するロケーションにより，ゲートウェイへのデータの到達率の影響が大きく変化する．すなわち，データ収集のアプリケーションの観点からは，一時的な無線環境の劣化に対して，データの到達率において大きく影響を受けるエリアを改善することが大きな課題となる．

上記課題に加えて，適用するアプリケーションによっては，無線ノードはバッテリ駆動となり，各無線センサノード及びワイヤレスセンサネットワークには低消費電力で動作することが求められる．バッテリ駆動の無線ノードでは，アクティブ状態とスリープ状態を繰り返す間欠動作が一般的であり，低消費電力化に向けては，パケット数の削減のみならず，アクティブ状態の時間を短くすること，すなわち，データ収集時間の短縮も課題である．

尚，今回のターゲットでは，無線センサノードにおけるメモリ量の制約より，各ノードが隣接ノードとの接続状況の履歴情報を保持することは難しい．そのため，経路構築では，

ゲートウェイ近傍のノードより，自ノードより遠方の情報を考慮することなく，その時点での情報に基づき Parent ノードを決定するため，各ノードを経由する経路数に大きな偏りを持ったツリー型ネットワークが構築される可能性がある(3．5．の図 3.6～図 3.8 を参照)．このことより，自律分散により構築されたネットワークを制御トラヒックのオーバヘッドを抑えつつ，各ノード配下のノード数を平滑化することも重要な課題となる．

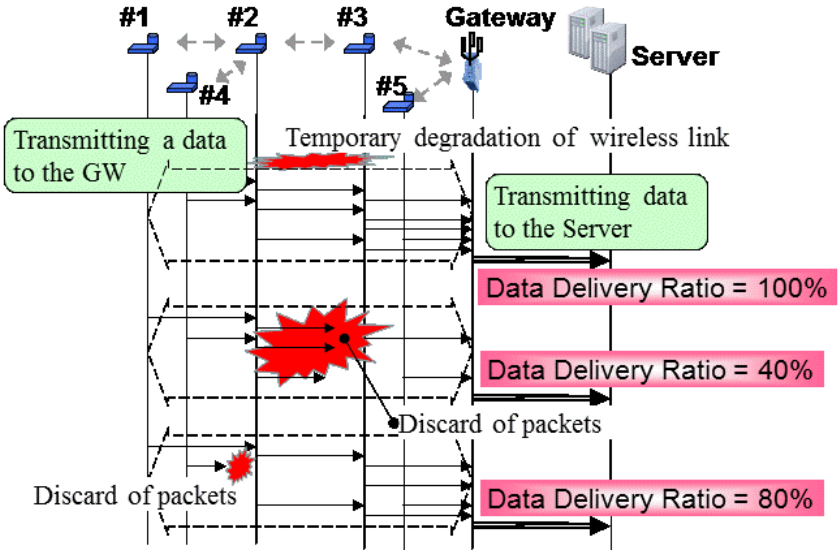


図 4.1　無線特性の変動による影響

4．3．無線リンク障害発生時のデータ到達率

ここでは，アプリケーションから見たネットワークの安定性を評価するための指標として使用する，無線リンク障害発生時のデータ到達率(Conditional DDR: Conditional Data Delivery Ratio with Wireless Failure)[48][49]について説明する．

今回のデータ収集向けワイヤレスセンサネットワークでは，ネットワーク上にデータパケットが存在する期間は限定的であり，データパケットが存在しない期間での無線リンクの変動は無視できる．そのため，データパケットの存在時に無線特性に変動があった時の影響が重要な評価項目となる．そこで，ワイヤレスセンサネットワークの安定性を議論する評価メトリックとして，無線リンク障害発生時のデータ到達率(Conditional DDR: cDDR)を新たに導入する．すなわち，ノード i の cDDR は，ツリー型のネットワークが構築されているワイヤレスセンサネットワークにおいて，通常時には通信が可能であったノード i とその Parent ノード間の無線リンクが一時的に障害となっていると仮定した時に，

その状態で他の無線ノードで発生したトラヒック(データグラム)がゲートウェイに到達する確率として定義し，(1)より算出する．

$$P_{g|f}(i) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1,\, k\neq i}^{N} Pg(k) \qquad (1)$$

$$Pg(k) = \prod_{j \in Route(k)} Pw(j) \qquad (2)$$

ここで，Pg(k)はノード k からゲートウェイ宛に送信されたパケットがゲートウェイに到達する確率を，Pw(j)はノード j とその Parent ノード間の無線リンクでパケットの転送に成功する確率を意味している．尚，$P_{g|f}(i)$計算時のノード i と Parent ノード間の Pw(i)は 0 となる．

図 4.2 は，3000×3000 のエリアの中央にゲートウェイを配置し，499 台の無線ノードをエリア内に一様に配置した際のノード毎の無線リンク障害発生時のデータ到達率(conditional DDR; cDDR)を示している．尚，無線伝搬距離は 350 とし，ゲートウェイからのホップ数が最短となるようにツリー型ネットワークを構築している．図 4.2 より，中央にゲートウェイを配置しているため，ゲートウェイ近傍の，すなわち，配下に数多くのノードを収容する中央付近のノードは，cDDR が小さくなる傾向にあることがわかる．また，中央付近のノードについては，ノード間で cDDR にバラつきが発生しており，経路の平滑化に向けたメカニズムの適用によりバラつきの改善が期待できる．

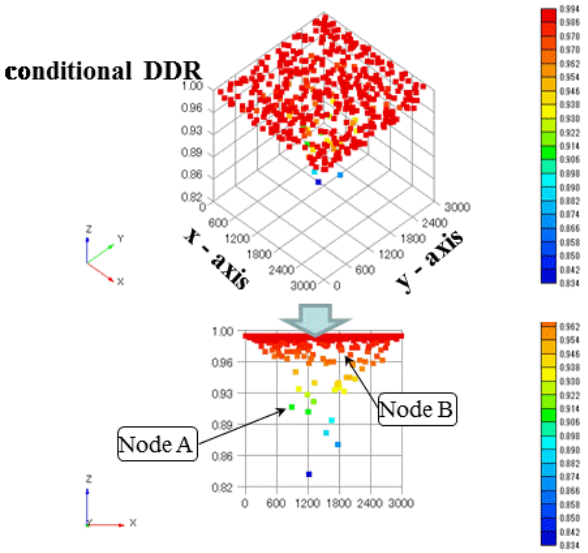


図 4.2 ノード毎の無線リンク障害発生時のデータ到達率

次に，無線リンク障害発生時のデータ到達率(cDDR)と，本論文で想定するデータ収集システムにおける，無線リンク障害による経路途中でのパケット損に起因するパケット数増

大，及びデータ収集完了までに要する時間増大の関係について説明する．本論文で想定するデータ収集システムでは，定期的な全ノードからのデータの一斉収集において，ゲートウェイは，全ノードからのデータの通知を待っている．そして，一定時間以内にデータの通知が到着しないノードについては，ゲートウェイは逐次に各ノードに対してデータの再収集を行う(図 4.3)．そのため，無線リンク障害による経路途中でのパケット損は，ゲートウェイによる該当ノードへの個別問合せ，及び応答によるパケット増の要因となる．ここで，1 個のパケット損により発生するデータの再収集に伴うパケット増は，ゲートウェイから該当ノードまでのホップ数×2(往復の通信)として見積ることができる．そして，データの再収集により増加する「のべパケット数」は，1 個のパケット損により発生するデータの再収集に伴うパケット数と，一定時間以内にデータの通知が到着しないノード数の積となる．また，ゲートウェイによるデータの再収集は，パケット損が発生したノードに対して，逐次に行われるため，データ収集時間の増大となり，データの再収集所要時間は，パケット損が発生したノード数と一回の再取得に要する時間の積となる．以上のように，無線リンク障害による経路途中でのパケット損に起因するパケット数及びデータ収集完了までに要する時間の増大は，データ収集時にパケット損が発生する割合に依存しており，無線リンク障害発生時のデータ到達率(cDDR)と相関関係にある．そのため，本論文では，無線リンク障害発生時のデータ到達率(cDDR)をもとに評価を行う．

例えば，図 4.2 において x 座標が 886.435 で cDDR が 0.9121 のノード(以後，ノード A と呼ぶ)について考える．ノード A は，実際にはゲートウェイから 2 ホップ離れた位置に存在しており，ノード A とその Parent ノード間の無線リンクに障害が発生した際には，ネットワークを構成するノード数×(1 - cDDR)より 43.35 台のノードに対してデータ欠損が発生すると見積ることができる．そして，これらのデータ欠損により，各ノードまでのホップ数として平均ホップ数(4.25 ホップ)を用いて，ネットワーク内で 368.48 パケットの発生，及び 22 秒の応答時間(一回の再取得に要する時間を 500ms と想定) の増大となる．一方，ノード A と同じホップ数に位置する x 座標が 1990.464 に存在するノード(以後，ノード B と呼ぶ)では，cDDR は 0.9737 であり，ノード B とその Parent ノード間の無線リンクに障害が発生した際には，13.15 台のノードに対するデータ欠損，111.78 パケットの発生，6.6 秒の応答時間の増大と見積ることができる．

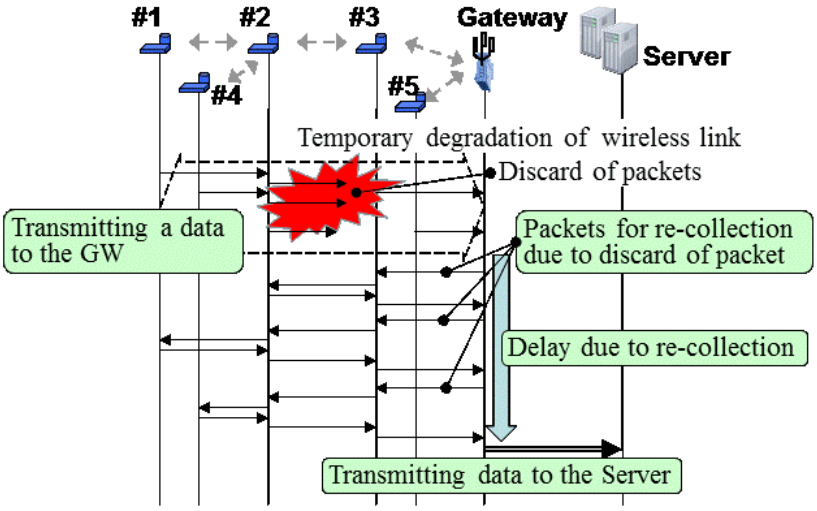


図 4.3 パケット損とデータの再取得の関係

4．4． 経路平滑化メカニズム

ここでは，経路平滑化メカニズムとして機能する，経路の公平性を実現する経路メンテナンス手法(Re-selection based route maintenance mechanism)について説明する(図 4.4). 本章で対象とするデータ収集システム向けのワイヤレスセンサネットワークは，3 章で述べた RPL をもとにツリー型のネットワークが構築されており，経路メンテナンスとして RPL の規定とは別に，ゲートウェイから一定周期での広告メッセージのフラッディングを行うものとする．

尚，提案手法は，3 つのステップ，(1)従来の RPL などの自律分散に基づく無線マルチホップネットワーク技術によるツリー型ネットワークの構築ステップ(セットアップ・フェーズ)，(2)経路の集中度合いをもとにしたゲートウェイにおける経路の再構築を望むエリア(無線ノード)を抽出するステップ(局所エリア抽出フェーズ)，及び(3)ゲートウェイにて抽出したエリアにおける経路の再構築ステップ(局所経路再選択フェーズ)から構成されている．ここで，今回のワイヤレスセンサネットワークでは，以下の理由により，ゲートウェイは，自律分散による各無線センサノードでの経路選択のサポートを行う機能を持つだけに留めている．

①無線センサノードの持つ CPU 処理能力やメモリ量に制約があり，各無線センサノードが隣接ノードに対する情報を十分に保持できないこと

②各センサノードが持つ情報が不十分なため，ゲートウェイにてセンサノード間の接

続可能性を完全に把握できないこと

③ゲートウェイあたり数百台規模の無線センサノードを管理するため，ゲートウェイが一意に最適な経路を決めることはゲートウェイにおける計算量の増大となること

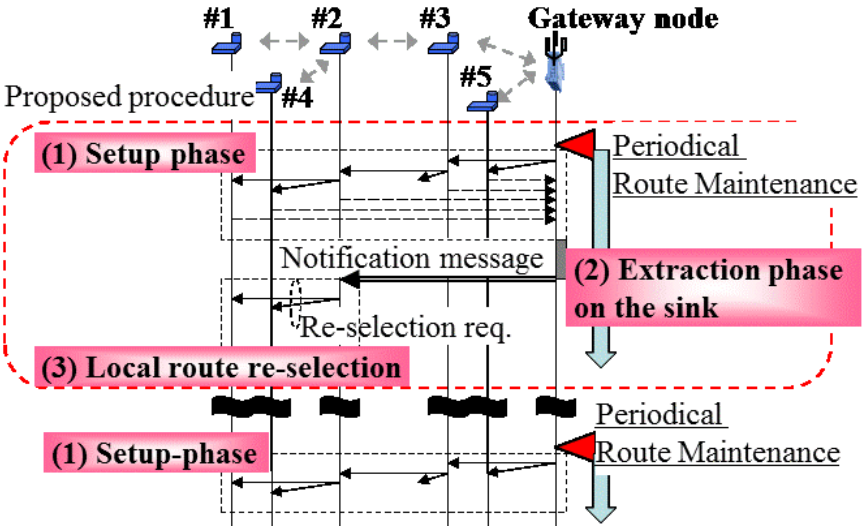


図 4.4 経路メンテナンス手法

4．4．1． セットアップ・フェーズ

ゲートウェイは周期的に経路のメンテナンスを行っており，RPL と同様に，上り方向の経路構築用のメッセージをフラッディングする．ここで，ゲートウェイからのフラッディングによる経路構築では，各無線ノードは，ゲートウェイまでの経路を確立した無線ノードのみを Parent ノードとして選択するため，ゲートウェイ近傍の無線ノードからネットワークが構築される．このため，セットアップ・フェーズでは，各無線ノードはゲートウェイに対して自ノードより遠方に存在する無線ノードの情報を考慮することができず，各無線ノードの配下に収容される無線ノード数に偏りが発生する可能性がある．尚，各無線ノードの持つメモリ量や CPU 処理能力に制約があるため，経路メンテナンスは過去の情報を考慮することなく，独立に試行されるものとする．

また，各無線ノードは上り方向の経路の学習後に，下り方向の経路確保のため，ゲートウェイに向けて制御メッセージを通知することにより，ゲートウェイは配下のツリー構造の情報を把握する．

4．4．2．　局所エリア抽出フェーズ

ゲートウェイは，セットアップ・フェーズにて構築したツリー型ネットワークに対して，一時的な無線リンクの無線通信特性の劣化における影響度を平滑化することを目的に，経路の再構築が望まれるエリアを抽出する．ここで，抽出する各エリアは，指定した無線ノードを根とするツリー型ネットワーク(サブツリー)である．尚，局所エリアの抽出にあたり，各無線ノードを経由する経路数の偏りを示す指標として，各無線ノードの偏差(Deviation(i))を(3)式で定義する．すなわち，ゲートウェイから同一ホップに位置するノード群における経路数の偏りを比較しており，Num(i)は無線ノード i を経由する経路数，Ave(h(i))及び Ver(h(i))は各ノードを経由する経路数に対するゲートウェイから h(i)ホップ離れた位置に位置するノード群における平均と分散である．また，h(i)は無線ノード i におけるゲートウェイからのホップ数である．

$$\mathrm{Deviation}(i) = \frac{10 \times \{\,\mathrm{Num}(i) - \mathrm{Ave}(h(i))\,\}}{\sqrt{\mathrm{Ver}(h(i))}} \quad (3)$$

上記で算出した各無線ノードの偏差(Deviation(i))をもとに，ゲートウェイから遠方のノードより経路の再構築が望まれるエリア，すなわち，サブツリーの根となる無線ノードを抽出する．尚，無線ノード抽出の条件は以下である．

1st：ゲートウェイから K ホップ以上離れた無線ノードについては，同一ホップ群の中で，偏差(Deviation(i))が閾値(Th_long)以上の無線ノードを抽出

2nd：ゲートウェイから K ホップ未満の無線ノードについては，同一ホップ群の中で，偏差(Deviation(i))の絶対値が Th_short 以上の無線ノードを抽出

ここで，上記条件について補足する．ツリー型のネットワークでは，根となるノードに近いノード群で収容するノード数が多くなり，遠方に位置するノードほど収容するノード数が少なくなる．そのため，根となるノードから遠方に位置するノードでは，経路再構築時の候補となるノード数が少なく，効果が限定的である．そのため，根となるノードより K ホップ未満のノード群における偏りの平滑化に注力する設計としている．但，ネットワーク内での物理的なノード配置による偏りに対処するため，K ホップ以上遠方のノードに対しても，最初に閾値(Th_long)以上の偏りとなるエリアの抽出を行っている．

尚，K を大きくすることにより抽出するノード数は増大し，次節で示す局所経路再選択処理に伴うパケット数が増大する．そのため，目標とするデータ収集率(Pc_target)と 1 つ前に実施した経路メンテナンスから，これまでの期間で行われた一斉のデータ収集におけるデータ収集率(Pc_past)の差，或いは目標とするデータ収集率(Pc_target)とネットワーク

を構築するノード数(N)より，(4)式をもとに許容する抽出ノード数(Nex_per)を算出する．そして，ツリー型のネットワークにおいて，根となるノードに近い同一ホップ数に位置するノード群から順番に，局所エリアの根となるノードを抽出し，(4)式で算出した許容する抽出ノード数(Nex_per)を最初に超えたホップ数を K とする．

$$\mathrm{Nex_per} = \begin{cases} \mathrm{N} \times (\mathrm{Pc_target} - \mathrm{Pc_past}) & \text{if } \mathrm{Pc_target} > \mathrm{Pc_past} \\ \mathrm{N} \times (1 - \mathrm{Pc_target}) & \text{if } \mathrm{Pc_target} \leqq \mathrm{Pc_past} \end{cases} \quad (4)$$

4．4．3．　局所経路再選択フェーズ

ゲートウェイは抽出した局所エリアの根となるノード(Sub-root)に対して，Parent ノードの再選択を要求する．ゲートウェイからの指示を受けたノード(Sub-root)は，ゲートウェイに対して遠方に隣接するノードに対して Parent ノードの再選択を要求する(図 4.5)．ここで，Sub-root における偏差がプラス，すなわち，平均の経路数より多くのノードを収容時は，Sub-root を Parent として選択しているノードに対して，別のノードを Parent として選択するように要求する．一方，Sub-root における偏差がマイナス，すなわち平均の経路数より少ないノードを収容時は，Sub-root を Parent として選択していない隣接ノードに対して，該当 Sub-root を Parent として選択するように要求する．尚，再選択時の Parent ノードの決定は以下に従う．

①無線ノードは乱数値を取得

②取得した乱数値が Parent 維持確率(Parent Retention Ratio :PRetention)よりも小さい時は，Parent ノードを変更せず終了

③Parent ノード変更時は，候補となる隣接ノードからランダムに選択

ここで，Parent 維持確率は，(5)式により決定する．すなわち，ゲートウェイからの指示を受けたノード(Sub-root)が自ノードを経由する経路数を平均に近づけるため，Sub-root における偏差((3)式より導出)をもとに計算する．尚， Sub-root における偏差がマイナスの時は，その Sub-root を Parent として選択していない隣接ノードに対して局所経路再選択の要求を通知するが，その Sub-root はそれらの隣接ノードの情報を持たないため，(5)式ではその Sub-root が位置するホップと同一ホップ群の平均経路数をもとに算出している．

$$\mathrm{PRetention}(i) = \begin{cases} \left\{ \mathrm{Ave}(h(i)) + \frac{TH}{10} \times \sqrt{\mathrm{Ver}(h(i))} \right\} / \mathrm{Num}(i) & \text{if Deviation}(i) > 0 \\ \left\{ \mathrm{Ave}(h(i)) - \frac{TH}{10} \times \sqrt{\mathrm{Ver}(h(i))} \right\} / \mathrm{Ave}(h(i)) & \text{if Deviation}(i) \leqq 0 \end{cases} \quad (5)$$

TH：局所エリア抽出のための閾値

また，Parent ノードを再選択した無線ノードは，新しい Parent ノードを介してゲートウェイに DAO メッセージを通知する．

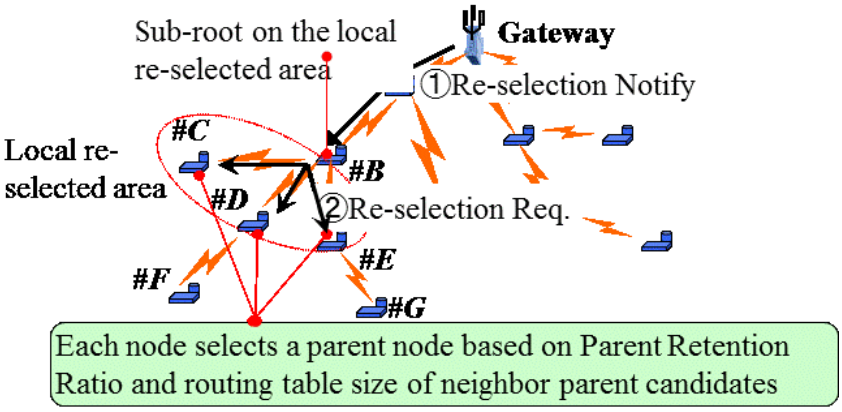


図 4.5　局所経路再選択処理

4．5．評価・考察

ここでは，コンピュータ・シミュレーションにより前節で示す経路メンテナンス手法(Re-selection based route maintenance mechanism)の有効性を，無線リンク障害発生時のデータ到達率(Conditional Data Delivery Ratio: cDDR)をもとに評価する．

尚，本論文でターゲットとするワイヤレスセンサネットワークによるデータ収集システムの適用例の 1 つであるスマートメーターネットワークにおいては，ネットワーク接続率の目標値として 95%が示されている[50]．そのため，本論文での評価基準としても，上記を参考に 95%(0.95)以下の cDDR を持つノード群に対する改善を議論する．

4．5．1．　コンピュータ・シミュレーション

コンピュータ・シミュレーションについて説明する．コンピュータ・シミュレーションでは，2 次元の任意のエリア(x 座標(Rx) × y 座標(Ry)で表示)にゲートウェイを含む N 台のノードを配置し，ノード間の距離をもとにゲートウェイを根とするツリー型のネットワークを構築する．そして，構築したツリー型ネットワークや本章で示す経路メンテナンス手法(以降，提案手法と呼ぶ)の適用により再構築されたツリー型ネットワークに対して，無線リンク障害発生時のデータ到達率を計算する．

尚，コンピュータ・シミュレーションでは，無線伝搬距離は 350 としており，ノード間距離に応じたパケットエラー率(PER)は図 4.6 をもとに算出している．ここで，図 4.6 はネットワークシミュレータ(NS-3)を用いて，IEEE802.11 b の 2Mbps で動作するモード，及び自由空間伝搬損失モデルでの電波伝搬条件にて 2 ノード間で連続してパケットの送受信を行った時の結果をもとに導出している．

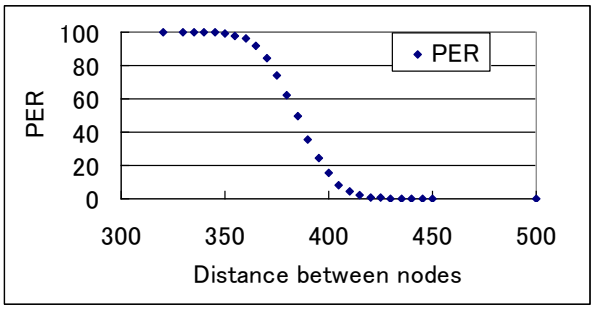


図 4.6 コンピュータ･シミュレーションにおける PER 特性

4．5．2． 基礎評価

500 台の無線ノードを 3000×3000 のエリアに一様に配置し，局所エリア抽出のための閾値や局所エリア抽出フェーズにおける無線ノード抽出時の閾値 K をパラメータとして，提案手法の有効性を評価する．尚，一様に無線ノードを配置しているため，閾値(Th_long)を十分に大きく設定することにより，K ホップ以上遠方のノードに対する局所エリア抽出の処理を省略している．また，セットアップ・フェーズにおけるツリー型ネットワークの経路構築は，ゲートウェイからのホップ数を経路メトリックとした従来からの経路制御方式(以降，"Original"と表記)を適用し，提案手法("Proposal” と表記)を適用後の無線リンク障害発生時のデータ到達率(cDDR)と比較している．ここで，コンピュータ・シミュレーションは 10 種類のノード配置のパターン，及び各ノード配置のパターン毎に 10 回の試行を行っており，その平均を示している．

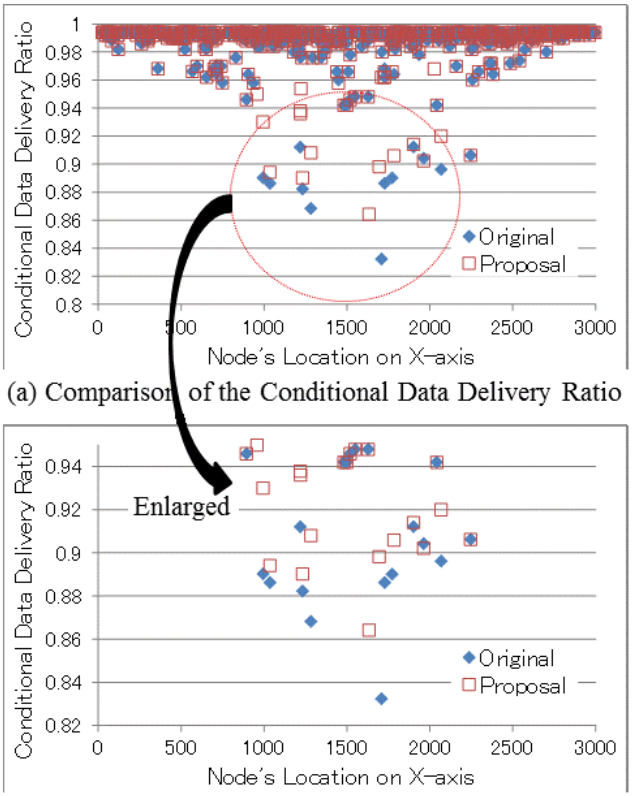
最初に，図 4.7(a)は局所エリア抽出のための閾値を 10，局所エリア抽出フェーズにおけ

る無線ノード抽出時の閾値 K を 3 とした際の，従来からの経路制御方式によるネットワーク構築時と提案手法適用時の無線リンク障害発生時のデータ到達率の比較を示している．ここで，横軸は各ノードの座標位置における x 座標を示しており，1500 の位置にゲートウェイが配置されている．本論文の目的は，安定したデータ収集の実現であり，無線リンク障害による影響が大きなノードに対して，その影響を抑制することである．そこで，図 4.7(b)は無線リンク障害発生時のデータ到達率(cDDR)が 0.95 以下となるノードだけを抽出した時の結果を示している．従来からの経路制御方式による経路構築時に対して，提案手法を適用することにより，相対的に cDDR の分散が改善されていることがわかる．尚，図 4.7 の結果は任意の 1 つのノード配置のパターンによる例であり，平均ホップ数は 4.25 となっている．

また，表 4.1 は，cDDR の平均(Average)，分散(Variance)，cDDR が 0.95 以下となっているノード群における cDDR の平均(Average for cDDR≦0.95)，及び局所エリア抽出フェーズにおいて抽出したノード数(Number of Extracted nodes)を示している．平均(Average)は．ネットワークを構成するノード数や平均ホップ数に変化がないため，提案手法による変化はない．一方，分散(Variance)は，提案手法の適用によりその分散値が小さくなっており，無線リンク障害により大きく影響を受けるエリアの改善が図られている．また，cDDR が 0.95 以下となっているノード群における cDDR の平均(Average for cDDR≦0.95)は，提案手法の適用によりその値が改善されており，無線リンク障害により大きく影響を受けるエリアでの提案手法の効果が確認できる．例えば，局所エリア抽出のための閾値が 10 の場合，提案手法適用により，cDDR が 0.95 以下となっているノード群における cDDR の平均(Average for cDDR≦0.95)は 0.906 から 0.910 と改善されている．この cDDR の改善幅(0.004)により，一回の一斉のデータ収集では，4．3．節で示すように，2 ノード(500 ノード×改善幅(0.004))に対するパケット損の改善，その結果 17 パケット(2 ノード×平均ホップ数(4.25)x2(往復の通信))の低減，及び 1 秒(一回の再取得に要する時間を 500ms と想定)のデータの再取得に要する時間の短縮が見込まれる．そして，この効果は，2．3．節で示すように 1 回の経路メンテナンス周期を 24 時間とした場合に，48~144 回の一斉のデータ収集のそれぞれに改善をもたらす．そのため，提案手法適用における効果は 24 時間で 748～2448 パケット数の削減，及び 48～144 秒のデータ再取得に要する時間削減の効果となる．尚，一回の一斉のデータ収集に対して，従来の経路制御方式によるネットワーク構築では，47 ノード(500 ノード x (1-cDDR))に対するデータの再取得が発生し，データの再取得に対して 399.5 パケット(47 ノード x 平均ホップ数(4.25) x 2(往復の通信))及び約 23.5 秒の時間を要する．このため，一回の一斉のデータ収集における 17 パケットの低減及び 1 秒のデータの再取得に要する時間の短縮は，約 4.3%の改善となる．このよ

うに, cDDR はパケット数の削減やデータ収集に要する時間の短縮に寄与する指標である.

ここで，2．3．節で述べたようにワイヤレスセンサネットワークについては，様々な場所でのワイヤレスセンサネットワーク構築を可能とするため，各無線センサノード及びワイヤレスセンサネットワークは低消費電力での動作が求められ，送信パケット数を抑えることが重要である．また，自然環境をモニタリングするようなアプリケーションでは，バッテリでの駆動も考えられる．バッテリ駆動時の無線センサノード及びワイヤレスセンサネットワークの動作そのものは本論文の取り扱う対象外ではあるが，アクティブ状態とスリープ状態からなる間欠動作による無線センサノードの省電力化が一般的となっており，アクティブ状態の期間を短くすること，すなわち，送信パケット数の削減やデータ収集時間の短縮が重要となってくる．このように，高頻度で長期間にわたりデータ収集を繰り返すシステムでは，若干の無線リンク障害発生時のデータ到達率(cDDR)の改善効果が，全体として大きな改善につながる．



(a) Comparison of the Conditional Data Delivery Ratio

(b) Focus of nodes with cDDR less than or equal to 0.95

図 4.7　無線リンク障害発生時のデータ到達率の比較

表 4.1　cDDR の平均，分散等の比較(N=500)

	Original	Threshold Value on the Extraction Phase			
		5	10	15	20
Average	0.987	0.987	0.987	0.987	0.987
Variance(x10^{-4})	3.70	3.17	3.45	3.50	3.62
Average for cDDR ≦0.95	0.906	0.914	0.910	0.911	0.907
Number of Extracted nodes	—	60.7	13.6	8.9	6.5

一方，図 4.8 は局所エリア抽出のための閾値を 5 から 20 まで変化させた時の無線リンク障害発生時のデータ到達率(cDDR)が 0.9 から 0.95 以下となる確率(cDDR の累積分布関数(Cumulative Distribution Function; CDF))の変化を示している．ここで，例えば，cDDR が 0.9 以下となる CDF は，cDDR が 0.9 以下の値をとるノード数の割合を示しており，無線リンク障害による影響が大きいエリアとして考えることができる．0.9 から 0.95 の間でバラつきが見られるが，提案手法の適用により無線リンク障害発生時のデータ到達率の改善を確認できる．尚，局所エリア抽出のための閾値が 10 の時が平均して改善効果を確認できること，及び局所エリア抽出のための閾値が 5 の時は，表 4.1 より局所エリア抽出フェーズにて抽出されるノード数が多くなることより，以降の評価においては，局所エリア抽出のための閾値は 10 としている．

図 4.9 は局所エリア抽出フェーズにおける無線ノード抽出時の閾値 K を 2 から 4 まで変化させた時の無線リンク障害発生時のデータ到達率(cDDR)が 0.9 から 0.95 以下となる確率の変化を，表 4.2 は局所エリア抽出フェーズにおける無線ノード抽出時の閾値 K に対して，cDDR の平均(Average)，分散(Variance)，cDDR が 0.95 以下となっているノード群における cDDR の平均(Average for cDDR≦0.95)，及び局所エリア抽出フェーズにおいて抽出したノード数(Number of Extracted nodes)を，示している． cDDR が 0.93 以下については，K=3 及び 4 において，効果にバラつきが見られるが，提案手法が有効であることが確認できる．ここで， 4．4．2．節で示すように，K の値は，目標とするデータ収集率(Pc_target)，1 つ前に実施した経路メンテナンスからこれまでの期間で行われた一斉のデータ収集におけるデータ収集率(Pc_past)，及びネットワーク形態により決まるパラメータである．今回の評価ではネットワークが安定しており，Pc_target > Pc_past であると想定し，(4)式より抽出可能ノード数として 25 を得る．表 4.2 より K=3 となり，提案手法が有効である範囲に収まることが確認できる．

さらに，図 4.10 は図 4.7 と同じ配置パターンにおける，一時的に障害が発生するノードのゲートウェイからのホップ数毎の cDDR の平均，及び同一ホップ内での最大値，cDDR

の分散値を示している．ゲートウェイ近傍のノードにおいて cDDR が低下しており，その最悪値も小さくなっていることがわかる．また，提案手法の適用により，cDDR の平均については大きな変化は見られないが，cDDR の同一ホップ内での最大値や分散値は改善している．尚，K=3 より 3 ホップ以上離れたノード群における cDDR の平均や最大値，分散値に変化は見られない．上記より，ツリー型ネットワークにおいて，根に近いエリアでの無線リンク障害の発生がデータ収集システムの性能に大きな影響を与えることが確認できるとともに，提案手法の適用により，ゲートウェイ近傍での cDDR が悪くなるノードに対する改善が図れることが確認できる．

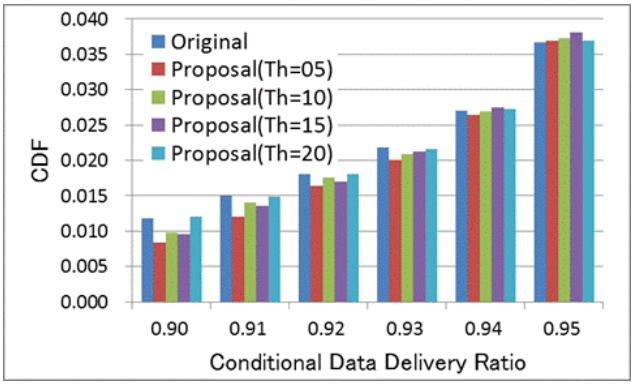


図 4.8　局所エリア抽出のための閾値による効果

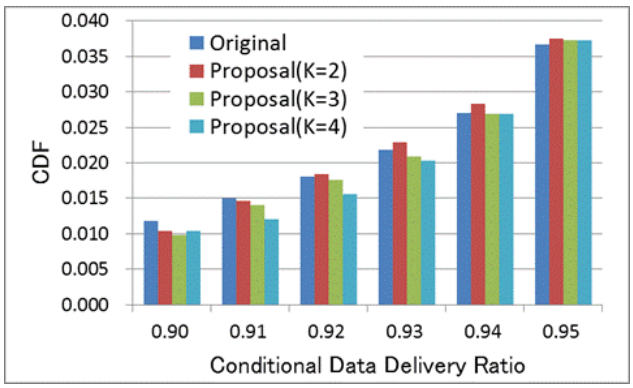


図 4.9　局所エリア抽出フェーズにおける無線ノード抽出の閾値 K による効果

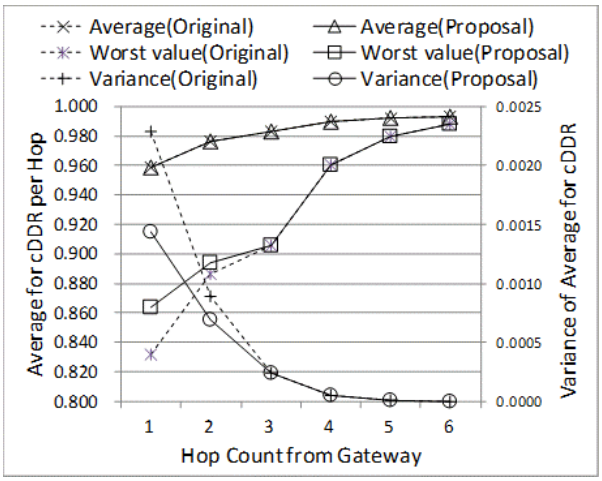


図 4.10 ゲートウェイからのホップ数による cDDR への影響

表 4.2 cDDR の平均，分散等の比較(局所エリア抽出フェーズにおける無線ノード抽出の閾値 K)

	Original	Threshold Value (K) for extracting nodes		
		2	3	4
Average	0.987	0.987	0.987	0.987
Variance($x10^{-4}$)	3.70	3.53	3.45	3.29
Average for cDDR ≦0.95	0.906	0.909	0.910	0.912
Number of Extracted nodes	—	10.7	13.6	26.3

4．5．3． ノード密度による評価

ツリー型のマルチホップネットワークにおいては，ネットワークの構成，すなわち，ノードの配置密度やネットワーク規模(最大ホップ数)などがデータ到達率などの性能に大きく影響する．本節では，3000×3000 のエリア内に配置するノード数，すなわち，各ノードの近傍に位置するノード数(ノード密度)をパラメータとして評価する．

図 4.11 は 250 台から 750 台の無線ノードを一様に配置した際の cDDR が 0.95 以下となっているノード群における cDDR の平均(Average for cDDR≦0.95)の変化を示している．提案手法を適用することにより，いずれのケースにおいても cDDR が 0.95 以下となっているノード群における cDDR の平均が改善されている．本論文の目的は，安定したデータ収集の実現に向けた無線リンク障害による影響が大きなノード群に対する改善であることから，この結果により提案手法は有効であるといえる．

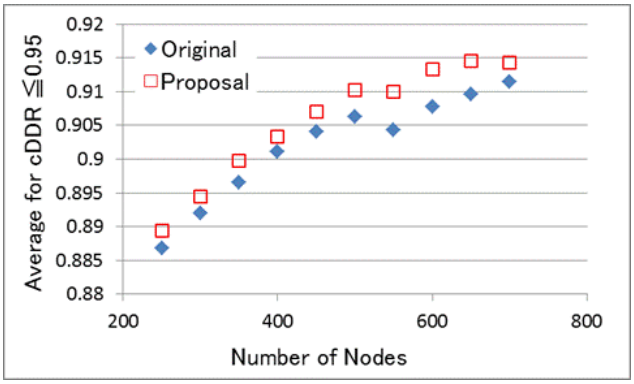


図 4.11　ノード数(ノード密度)による効果

4．5．4．　ノード配置による評価

ワイヤレスセンサネットワークの実環境への展開においては障害物の存在などにより，一様に無線ノードが配置されることはない．ここでは，ツリー型のネットワーク形態に偏りが存在する時の評価を行う．すなわち，ノードの配置については，図 4.12 に示すように，3000×3000 のエリア内にノードが存在しないエリア(ホール;Hole)を設け，ホールを除くエリアに一様にノードを配置している．尚，エリア内のホールの数を 1 から 4 と変化させて，提案手法の適用による効果を評価している(図 4.13)．図 4.13 より経路に偏りが存在する，すなわち，ノードが一様に配置されていない時でも，提案手法の適用により，無線リンク障害時のデータ到達率の改善を確認できる．実際のネットワークにおいては，物理的な偏りも存在しており，提案手法により公平性を改善することが期待できる．尚，表 4.3 にエリア内に 1 及び 4 か所の無線ノードが配置されないエリア(Hole)が存在する際の，cDDR の平均(Average)，分散(Variance)，cDDR が 0.95 以下となっているノード群における cDDR の平均(Average for cDDR≦0.95)を示す．分散(Variance)及び cDDR が 0.95 以下となっているノード群における cDDR の平均(Average for cDDR≦0.95)が改善していることが確認できる．

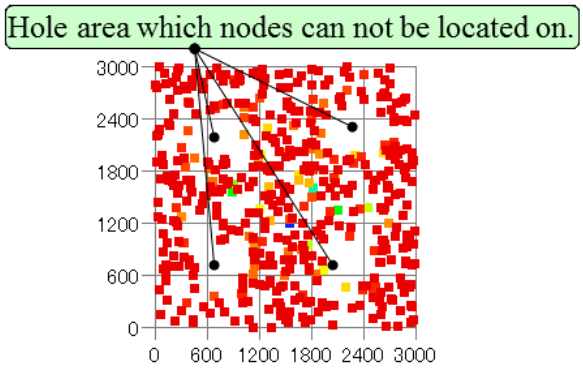


図 4.12　エリア内にホール存在時の配置図

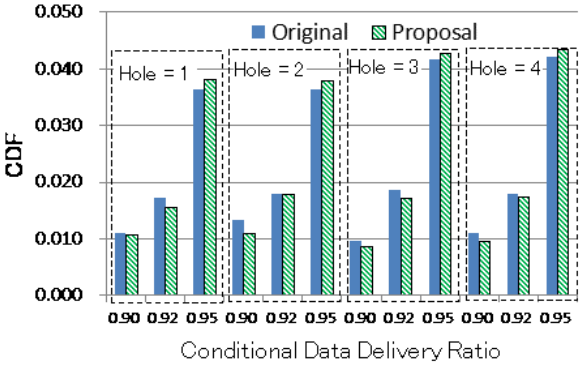


図 4.13　ノード配置による効果

表 4.3　cDDR の平均 ，分散等の比較(Hole 存在時)

	Hole = 1		Hole = 4	
	Original	Proposal	Original	Proposal
Average	0.987	0.987	0.987	0.987
Variance(x10^{-4})	3.71	3.39	3.81	3.42
Average for cDDR ≦0.95	0.907	0.912	0.910	0.915

4．6．むすび

本章では，データ収集向けのワイヤレスセンサネットワークに対して，データ収集(アプリケーション)の特性や無線通信特性のダイナミック性を考慮した評価指標として，無線リンク障害発生時のデータ到達率を導入した．そして，安定したデータ収集の観点からネットワーク安定性向上に向けて，経路メンテナンスと連携して経路の公平性を向上させる経

路メンテナンス手法について述べた．さらに，コンピュータ・シミュレーションにより，無線リンク障害発生時のデータ到達率の観点から提案手法の有効性を確認した．また，無線センサノード及びワイヤレスセンサネットワークの低消費電力動作に向けて，本章で導入した指標である無線リンク障害発生時のデータ到達率は，パケット数の削減及びデータ収集に要する時間の短縮に寄与する指標であることを示した．

監視(或いはモニタリング)ネットワークやスマートメーターネットワークに代表される大規模データ収集システムでは，平均的に確実にデータを収集することが求められるだけでなく，安定してデータを収集することが重要である．そのため，本章で述べた経路メンテナンス手法により，ツリー型ネットワークにおける各ノードへの経路の公平性，すなわち，安定したデータ収集の実現が期待できる．

今後は，隣接ノードとの受信電波強度に応じた無線環境の変動をモデル化し，隣接ノードとの受信電波強度を考慮した局所経路再選択による更なる経路公平性の向上などの課題が考えられる．

第5章　緊急呼の通信品質向上を図るデータ通知手法

5．1．まえがき

前章では，確実に且つ安定してデータを収集するための頑強なデータ収集向けワイヤレスセンサネットワークの構築について述べた．本章では，定期的に各センサノードよりセンシングされたデータを Best-effort にて収集するワイヤレスセンサネットワークにおいて，個別のセンサノードから緊急性を要するメッセージを特定のノードに確実に且つ迅速に転送するためのデータ通知手法の提案を行う．ここで，本論文では緊急性且つ確実性を要求するメッセージを緊急呼(Urgent messages)と呼んでいる．

近年の無線テクノロジーや電子デバイスの進展に伴い，低コストにより構築可能なワイヤレスセンサネットワークに対する関心が高まっている[1][2]. ワイヤレスセンサネットワークは，センシングやコンピューティング，無線通信の機能を持つセンサノードよりなるネットワークであり，モニタリング等を必要とするエリアに任意に配置されるノードにより構成されるアドホックネットワークである．ここで，ワイヤレスセンサネットワークを活用したアプリケーションについては，ターゲット・フィールドのイメージング，軍事用途での適用，不正進入・盗難検知，防犯・セキュリティ，気象や農業分野における環境モニタリング，温度・圧力等の状態検知，工業分野での制御，防災・災害対策など，多様なアプリケーションが想定されている．そのため，安全，安心，快適で豊かな社会を実現するための技術基盤として期待されている．このワイヤレスセンサネットワークの実現に向けては，CPU 処理能力，メモリリソース，通信能力，バッテリリソース等に制約のあるセンサノードをターゲットに，従来から経路制御方式や低消費電力化技術，データ収集などの研究開発が行われてきている．しかしながら，従来の研究開発においては，単一種類のアプリケーションを想定した研究が中心となっていた．

上記に対して，様々なアプリケーションがワイヤレスセンサネットワーク上でサービスされることが期待されている．例えば，あらゆる人やモノがネットワークに繋がり，いつでも，どこでも，誰にでも欲しいサービスが利用できるユビキタスネット社会の実現に向けて，人・モノの状況やそれらの周辺環境等を適格に認識し，自律的な情報流通に基づい

て状況や周辺環境に即した最適な動作を行うことを可能とするユビキタスセンサネットワークが議論されている[51]．このようなセンサネットワークでは，様々なリソースや機能を持つデバイスがネットワークに接続され，ネットワーク上で多様なアプリケーションが実現される．すなわち，単一のセンサネットワーク上に多様なアプリケーションがオーバレイする形態(図 5.1)となる．

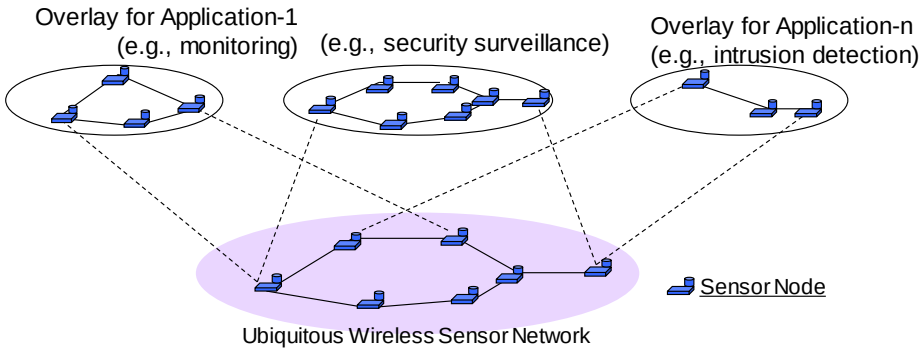


図 5.1　複数のアプリケーションに活用されるワイヤレスセンサネットワークの概念

そこで本章では，ワイヤレスセンサネットワークにおける QoS の提供，特に，多様なアプリケーションが同時に存在するもとでの緊急性且つ確実性を要求するメッセージを特定のノードに通知することを可能とするために，無線環境の特性を考慮した，複数パスによる同時転送手法と呼ぶデータ通知手法を提案する[5][52][53]．提案するデータ通知手法は，ワイヤレスセンサネットワークを構築し，通常メッセージのデータ転送に適用される経路制御方式とは独立に動作することを前提としており，メッセージ中の識別子により緊急性且つ確実性を要求するメッセージを識別し，識別した該当メッセージのみに対して作用する．尚，緊急性且つ確実性を要求するメッセージ(緊急呼:Urgent messages)の一例としては，防犯・セキュリティ，気象や農業分野における環境モニタリングなどで，Best-effort 型に基づくサービスとして定期的にセンサノードより，例えば温度や湿度，照度，気圧などのセンシングデータの情報を収集している状況において，センシングする情報に急激な変化を検知した際のセンサノードから自律的な警報メッセージの通知などがある．

ここで，異なる QoS レベルを要求する多様なアプリケーションのサポートに向けては，従来の Best-effort 型サービスの提供に加えて，リアルタイム性やロバスト性，確実性のサポートが重要になる．しかしながら，完全な QoS のサポートに向けては，ホップ数による端末間の最短経路を求めるだけでなく，要求される QoS を満たすための経路計算が必要であり，帯域，遅延，パケット損失率といった各種メトリックを考慮する必要がある．さらに，ワイヤレス環境，及びマルチホップ通信の環境においては，フェージングやシャドーウィング等の影響による時間的な伝送特性の変動やパケット損失(及びリンク切断)の要因となるバースト的な伝送誤りによるダイナミックなメトリックの変動を考慮する必要があ

り，完全な QoS サポートはより大きなチャレンジとなる．そのため，本章では，完全な QoS サポート，すなわち，あらゆる QoS レベルへの対応を実現する経路制御方式ではなく，ワイヤレスセンサネットワーク上で緊急性且つ確実性を要求するメッセージを転送するための転送手法に注力している．

5．2． 緊急呼の転送に関わる課題

ワイヤレスセンサネットワーク上で多様なアプリケーションを提供するためには，アプリケーションに依存しない経路制御,及びデータ転送に関わる手順が必要となる.ここで,従来からのアドホックネットワークに関わる議論では，アドホックネットワーク内の任意のノード間での通信に向けた経路制御を主目的にしており,基本的には Best-effort 型のサービスの提供である．そのため，全てのメッセージは各メッセージの要求する QoS レベルに関わらず同一に扱われ，例えば，確実性を要求するメッセージに対しても，Best-effort 型サービスと同じ経路により転送される，或は中継ノードにおける輻輳時には，緊急性を要求するメッセージの処理が後回しにされるといったように，緊急性を要するパケットの転送については十分に議論がなされていない．ここでは，ワイヤレスセンサネットワークにおいて緊急性を要するパケットを確実に且つ迅速に特定のノードに対して転送するための課題，(1)緊急性を要するパケットの送信開始時の経路探索遅延，及び(2)途中経路でのパケット損について述べる．

(1)緊急性を要するパケットの送信開始時の経路探索遅延

ワイヤレスセンサネットワークでは，多数のセンサノードの収容が求められており，経路制御方式のスケーラビリティは大きな課題である．そのため，センサノードの持つメモリ量の制約などを考慮し，On-Demand 型の経路制御方式が主流となっている．しかしながら，既存の On-Demand 型の経路制御方式では，通信の開始時に送信先に向けた経路を構築しており，緊急性を要する通信から見ると，処理遅延の増大となる．すなわち，通信開始時の経路探索に伴う遅延の低減が大きな課題となる(図 5.2)．ここで，RPL ではゲートウェイを根とするツリー型のネットワークを構築しており，各ノードはゲートウェイに向けた経路は常に保持する経路制御方式となっている，そのため，ゲートウェイに向けた通信については，通信開始時の経路探索遅延に関わる課題は解消されている．しかしながら，次に述べる経路途中でのパケット損に関わる課題は残されている．

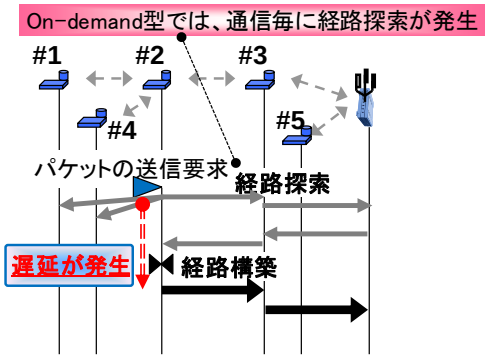


図 5.2　緊急性を要するパケットの送信開始時の経路探索遅延に関わる課題

(2)途中経路でのパケット損

無線リンクの伝送品質は，3 章でも述べたようにフェージングやシャドーウィング等の影響により，伝送特性は時空間的に変動しており，確立した経路を用いた通信においても，経路途中でのパケット損失が発生する可能性がある．そして，経路途中でのパケット損失に対して，アプリケーションでの再送などにより確実なデータ転送の実現となる．この場合，アプリケーション層におけるパケット損失の検出やパケットの再送を行う必要があり，大きな遅延発生の要因となる(図 5.3).

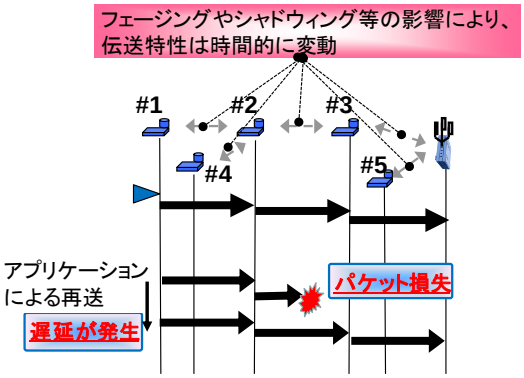


図 5.3　経路途中でのパケット損による再送に伴う遅延に関わる課題

ここで，ワイヤレスセンサネットワーク上での緊急性且つ確実性を要求するメッセージ(緊急呼：Urgent messages)の転送の実現に対しては，ブロードキャストによる転送(Broadcast forwarding)や複数経路の探索及びホップ・バイ・ホップによる転送(Multiple path discovery and hop-by-hop forwarding)，複数パスに対する転送(Multi-path forwarding)などのアプローチがある．しかしながら，ブロードキャストによる転送(Broadcast forwarding)では，ブロードキャストにて緊急呼(Urgent messages)をネットワーク全体に転送，すなわち，各ノードが受信メッセージをブロードキャストするため，ネットワーク内で転送されるメッセージが増大し，バッテリ容量や CPU 処理能力等のリソ

ースに制約をもつセンサノードにおいては，ブロードキャストのメッセージに対する送受信が大きなオーバヘッドとなる問題がある．

また，AOMDV[54]のような複数経路の探索及びホップ・バイ・ホップによる転送(Multiple path discovery and ho-by-hop forwarding)は，経路探索時に送信元ノードと送信先ノード間で複数の互いに素な，且つループフリーの経路を求め，経路上でのエラー検出時に効率的に別の経路に切替えることを特徴とするアプローチである．しかしながら，各メッセージは，単一の経路に沿って転送されるため，確実性を要求する緊急呼(Urgent messages においては，経路上でのパケット損失等に対して上位レイヤ(或いはアプリケーション)での再送制御が必要となる．ここで，上位レイヤにおける再送は，アプリケーションの観点から予期しない転送遅延の要因となり，確実性のみならず緊急性を要求する緊急呼(Urgent messages)においては大きな問題となる．

複数パスに対する転送(Multi-path forwarding)では，送信元ノードと送信先ノード間で複数の経路を求め，求めた複数の経路に沿ってメッセージを転送するアプローチであり，無線リンク上でのパケット損失に対する冗長性は，送信元ノードと送信先ノード間で確立される経路数に依存する. しかしながら, リソースに制約があるセンサノードにおいては，送信元ノードと送信先ノード間での複数の冗長経路の探索や保持に要するオーバヘッドが問題となる．また，緊急性を要求するメッセージにおいては，メッセージの送信の先立ち必要となる経路探索による遅延も問題となる．

5．3． 緊急呼のデータ転送

ここでは，ワイヤレスセンサネットワーク上で緊急性且つ確実性を要求するメッセージ(緊急呼 : Urgent messages)を転送するためのメカニズムである，複数パスによる同時転送手法(Multi-path and Simultaneous Forwarding Method)について説明する．最初に，複数パスによる同時転送手法の概要を示し，続いて，複数パスによる同時転送手法を構成する 2 つのメカニズム，特定ノードに向けた N 次冗長の経路探索(the N-th redundant pseudo-permanent route discovery)と複数パスによるホップ・バイ・ホップ転送(the hop-by-hop forwarding on multi-path)について説明する．

ここで，ワイヤレスセンサネットワークの構築については，CSMA (Carrier Sense Multiple Access)に基づくメディアアクセス制御(MAC: Media Access Control)を前提とするが，CSMA 型の MAC に依存するものではない．また，緊急呼(Urgent messages)を除

く通常のメッセージについては， AODV[34]や DYMO[35]，RPL[41]などの経路制御方式にて議論される経路探索手順や転送手法が適用されるものとする．

5．3．1．　複数パスによる同時転送手法の概要

本章で述べる複数パスによる同時転送手法は，緊急性且つ確実性を要求するメッセージ(緊急呼 : Urgent messages)の発生頻度は稀であるとの仮定のもと，複数の隣接ノードに対してメッセージを転送することによる通信トラヒック量の増大よりも，送信先ノードへ緊急呼(Urgent messages)を迅速に且つ確実に転送することを目的としている．複数パスによる同時転送手法の設計思想は以下である．

(1)単一のワイヤレスセンサネットワーク上で Best-effort 型のメッセージと緊急性且つ確実性を要求するメッセージ(緊急呼：Urgent messages)の共存を実現

(2)メモリリソースに制約のあるセンサノードでの実装を考慮し，緊急呼(Urgent messages)の転送に関わる処理を簡素化

尚，複数パスによる同時転送手法は，無線リンク上でのパケット損失の発生を考慮したメカニズムであり，①N 次冗長の経路探索(the N-th redundant pseudo-permanent route discovery)と②複数パスによるホップ・バイ・ホップ転送(the hop-by-hop forwarding on multi-path)の 2 つの機能より構成される(図 5.4)．ここで，複数パスによる同時転送手法は，緊急呼(Urgent messages)の転送に対してのみ適用され，その他のメッセージについては，On-demand 型の経路制御方式或いは RPL が適用されるものとする．複数パスによる同時転送手法の特徴は以下となる．

(1)アプリケーションの観点から，緊急呼(Urgent messages)において要求される緊急性且つ確実性を満たすパケットの転送を実現

(2)ワイヤレスセンサネットワーク内の各ノードにおける処理量の増大を抑制

(3)ワイヤレスセンサネットワーク内のトラヒック量を抑制

このように，複数パスによる同時転送手法は，無線伝搬状況が変動しやすい LLN (Low power and Lossy networks)と呼ばれる不安定な無線リンクを用いたマルチホップネットワーク環境下においても，特定ノードに対して迅速且つ確実な通知が求められる緊急性を要するメッセージを効率的に転送しようとするものである．

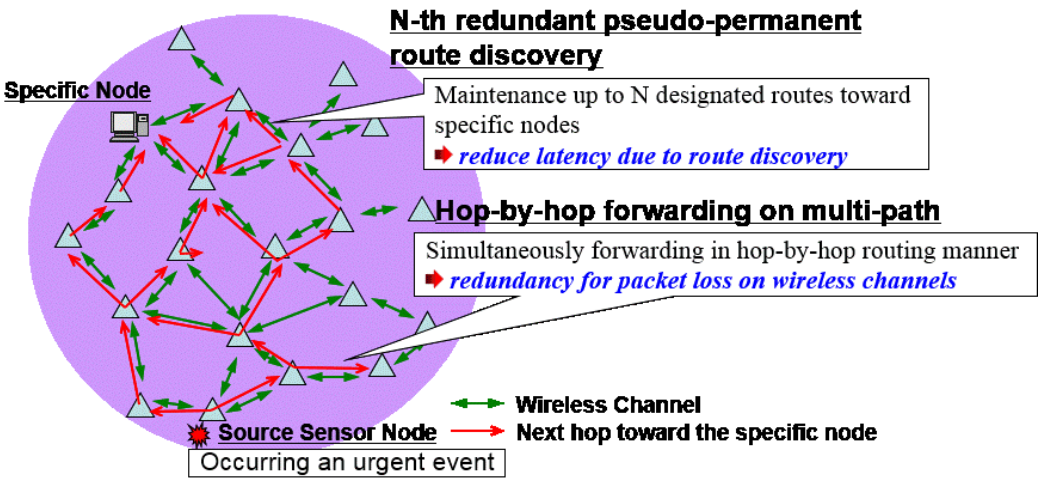


図 5.4 複数パスによる同時転送手法

5．3．2． 特定ノードに向けた N 次冗長の経路探索

特定ノードに向けた N 次冗長の経路探索機能は，異常情報等のイベントを収集する特定ノードに対する経路，すなわち緊急呼(Urgent messages)の送信先に対する経路について，予め特定ノード宛の代表経路を探索・維持する機能である．各ノードは，起動時，及び該当経路のライフタイムがタイムアウト時に，設定情報により規定される特定ノードに対して，最大 N 個までの冗長経路を確保する．すなわち，各ノードは<特定ノードのアドレス，次ホップ(特定ノードに向けた隣接ノード)>を対とする最大 N 個までの転送先を示す経路エントリ(binding record)を保持する．ここで，ワイヤレスセンサネットワークにおいては，個々のノードは静的である，すなわち移動がほとんど無い(“low mobility”)を想定し，特定ノード宛の転送先を示す経路エントリ(binding record)は，大きなライフタイム(余命時間)を持つことにより，特定ノード宛へのメッセージの有無に関わらず該当エントリを保持する．一方，隣接ノードへのパケットの転送失敗や他の隣接ノードとの経路メンテナンス手法により，隣接ノードに対する無線状態が変化した際には，特定ノードに対する N 次冗長の経路探索を再度，実施するものとする．

図 5.5 は，ノード起動時の特定ノードに向けた N 次冗長の経路探索機能に関するシーケンスを示している．各センサノードは起動時に，Route Request for Urgent Message をフラッディングする．既存の On-demand 型のルーティング・プロトコル(AODV や DSR 等)では，フラッディングによるメッセージを受信する中継ノードは，受信したフラッディングによるメッセージの重複チェックを行い，重複して受信したフラッディングによるメッセージを廃棄するが，特定ノードに向けた N 次冗長の経路探索機能においては，予め規定

される回数(ここでは N 回)までの重複受信を許容する．尚，特定ノードから各センサノードへの経路については，”short lifetime”(余命時間を短く設定)を持つエントリを作成し，一定時間後に削除される．

同様に，特定ノードにおいても，予め規定される回数までの重複受信を許容し，各 Route Request for Urgent Message に対して Route Reply for Urgent Message を通知する．ここで，Route Reply for Urgent Message は Route Request for Urgent Message の転送時に作成したエントリを使用して，各中継ノードにて複数の次ホップに向けて転送される．

ここで，各中継ノードは，緊急呼(Urgent messages)を受信・転送する際に，緊急呼(Urgent messages)の送信元ノードへの経路に対して”short lifetime”を持つエントリを作成する．この機能により，各中継ノードにおいては特定ノードに向けた経路のみを常時保持し，且つ特定ノードからの経路については特定ノード宛の緊急呼(Urgent messages)転送時のみに保持することにより，各中継ノードにおいて保持するテーブル量を削減している．

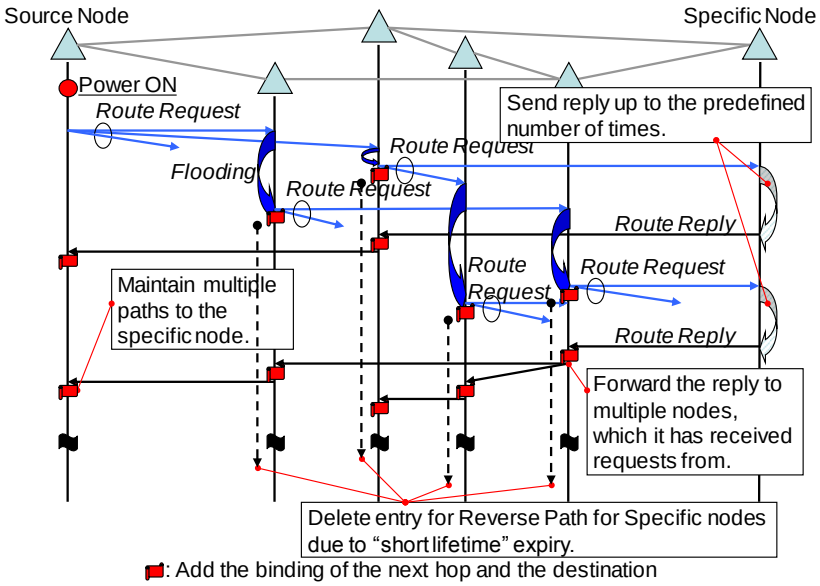


図 5.5 特定ノードに向けた N 次冗長の経路探索機能

5．3．3． 複数パスによるホップ・バイ・ホップ転送

複数パスによるホップ・バイ・ホップ転送機能は，各中継ノードが，緊急呼(Urgent messages)を中継する際の転送機能であり，緊急呼(Urgent messages)を受信するノードは，緊急呼(Urgent messages)の送信先に対して保持する経路情報に従い，複数の次ホップに

向けて受信した緊急呼(Urgent messages)を同時に転送する機能である(図 5.6)．ここで，中継ノードは，転送パケットの重複検出に基づき，既に転送済の緊急呼(Urgent messages)を廃棄することにより，ワイヤレスセンサネットワーク内で転送されるトラヒック量の抑制を図る．

例えば，環境モニタリングなどにおいてセンシングする温度などの異常状態を検出したセンサノード(送信元ノード)は，複数の次ホップに対して異常状態の検出を示す緊急呼(Urgent messages)を送信する．緊急呼(Urgent messages)を受信する中継ノードは，受信した緊急呼(Urgent messages)のシーケンス番号を確認することにより，未転送の緊急呼(Urgent messages)受信時は，受信した緊急呼(Urgent messages)を自身の持つ経路情報に従い，複数の次ホップに対して転送する．一方，送信先ノード(緊急呼(Urgent messages)に対する特定ノード)は，最初に緊急呼(Urgent messages)を受信した際に，緊急性を要する情報を処理するアプリケーションである上位層に緊急呼(Urgent messages)の受信を通知する(図 5.6)．

ここで，DYMO や AODV，RPL などの既存のアドホックネットワークに関わる経路制御方式では，中継ノードは単一の次ホップに対してのみ受信したパケットを転送するだけである．また，複数経路による転送手順に分類される”multipath routing protocol”においても，送信元ノードから複数の経路によりパケットが送信されるが，中継ノードにおいては単一の Next hop に対して転送されるのみである．このため，ここでの複数パスによるホップ・バイ・ホップ転送機能により，緊急呼(Urgent messages)の転送中に無線リンクにおいてパケット損失が発生するような不安定な無線リンクを用いたワイヤレスセンサネットワークにおいても，アプリケーションから見て低パケット損失率による緊急呼(Urgent Messages)の転送が可能となる．

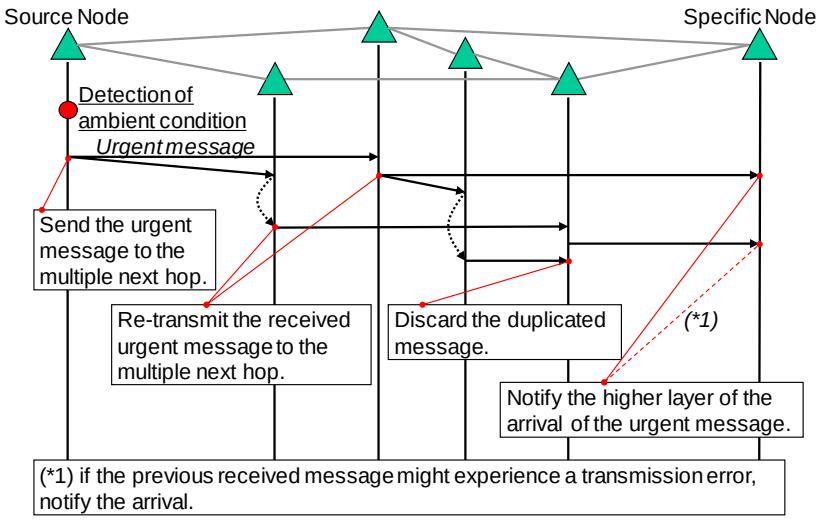


図 5.6 複数パスによるホップ・バイ・ホップ転送機能

5．4． コンピュータ・シミュレーションによる評価

ここでは，本章で述べる複数パスによる同時転送手法の有効性について，無線リンクにおけるパケット損失率をパラメータとし，緊急呼(Urgent message)転送時のメッセージ損失率やトラヒック量についてコンピュータ・シミュレーションにより評価する．

5．4．1． シミュレーションモデル

図 5.7 にシミュレーションモデルを，表 5.1 にシミュレーションパラメータを示す．方形エリア(Simulation Area)に N 個のセンサノードと緊急呼(Urgent messages)を受信する特定ノード(Specific Node)を配置する．センサノードはエリア内に一様に配置する．尚，コンピュータ・シミュレーションは，方形エリアのサイズを固定する場合と単位エリア当りのノード数(ノード密度)がほぼ一定となるようにセンサノード数に応じて方形エリアのサイズを可変とする場合について行っている．

コンピュータ・シミュレーションにおいては，各センサノードから特定ノードまでの経路を予め計算しておき，緊急呼(Urgent messages)を通知する際のオーバヘッドの評価に注力する．すなわち，コンピュータ・シミュレーションでは，任意のセンサノードを選択し，選択したセンサノードから特定ノードに向けて緊急呼(Urgent messages)を送信する

際のメッセージ損失率，及び正規化トラヒック量を評価している．ここで，メッセージ損失率及び正規化トラヒック量の定義は以下である．

メッセージ損失率(Message Loss Rate)：

センサノードより特定ノードに向けて通知される緊急呼(Urgent messages)が，特定ノード上のアプリケーションにおいて受信されない割合であり，End-to-End でのメッセージ損失率に相当

正規化トラヒック量(Normalized Traffic)：

単一の緊急呼(Urgent message)を送信するためにワイヤレスセンサネットワーク内で転送される平均メッセージ数

尚，今回のコンピュータ・シミュレーションにおいては，無線リンクにおけるパケット損失率は，ノード間の距離によらず各リンクにおいて同じ特性を示すものとしている．

また，コンピュータ・シミュレーションでは，複数パスによる同時転送手法における緊急呼(Urgent messages)のメッセージ損失率，及び正規化トラヒック量を評価するとともに，AODV や DYMO などで想定する既存の単一経路による転送手法(“Existing ad hoc routing”と記述)や複数経路による転送手順に分類される”multipath routing protocol”による転送手順(“Multi-path forwarding”と記述)との比較を行っている．ここで，“Multi-path forwarding”においては，送信元ノードと特定ノード間の複数の経路が構築されており，特定ノードへのメッセージが複数の経路に従って転送されるものとする．尚，コンピュータ・シミュレーションでは特定ノードに向けて 2 つの経路を構築している．

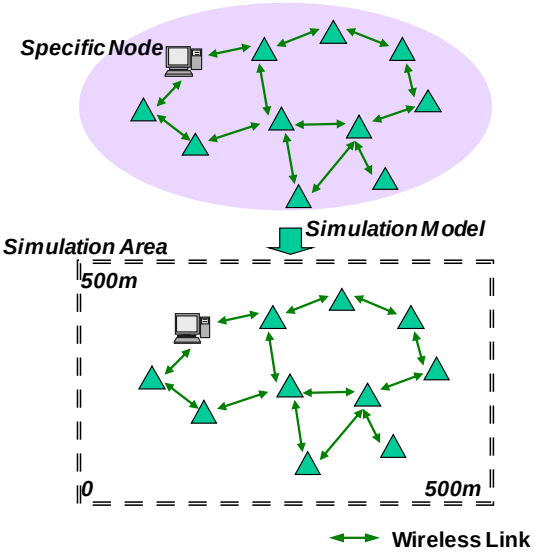


図 5.7 複数パスによる同時転送手法の評価に対するシミュレーションモデル

表 5.1　シミュレーションパラメータ

Number of sensor nodes	49,99,199,499,799,999
Number of specific nodes	1
Size of simulation area	500m x 500m
Communication rage of each sensor node	120m
Length of an urgent message	1 packet
Number of urgent messages	10,000 messages
Number of next hops toward the specific node	2, 3, 4
Note:	シミュレーションエリア(500m x 500m)内に 49 ノードが存在時，平均ホップ数，最大ホップ数及び最小ホップ数は，3.03, 6, 1. 同様に，シミュレーションエリア(500m x 500m)内に．999 ノード存在時，平均ホップ数，最大ホップ数及び最小ホップ数は，2.34, 4, 1.

5．4．2.　シミュレーション結果及び考察

図 5.8 及び図 5.9 は，50 ノード時のメッセージ損失率(Message Loss Rate)及び正規化トラヒック量(Normalized Traffic)を示している．尚，複数パスによる同時転送手法の特定ノード向けの次ホップ数を 2(Path = 2)と設定している．ここで，既存アドホックルーティングに対するコンピュータ・シミュレーションでは，転送する緊急呼(Urgent messages)のメッセージ損失率(Message Loss Rate)及び正規化トラヒック量(Normalized Traffic)の比較に注力するため，次ホップへのメッセージの転送に失敗した際のメッセージ再送や経路の再構築は実施していない．

図 5.8 より，複数パスによる同時転送手法におけるメッセージ損失率(Message Loss Rate)は既存手法や Multipath forwarding の手法に対して，小さくなっていることが確認できる．これは，複数パスによる同時転送手法では，各中継ノードが受信した緊急呼(Urgent messages)に対しては，複数の次ホップに転送することによる．図 5.9 は，中継ノードにおける複数の次ホップへの転送により，複数パスによる同時転送手法による正規化トラヒック量(Normalized Traffic)は他のアプローチに比べて大きくなることを示している．しかし，各ノードにおける転送パケットの重複検知により緊急呼に対する正規化トラヒック量(Normalized Traffic)の膨大は制限されている．

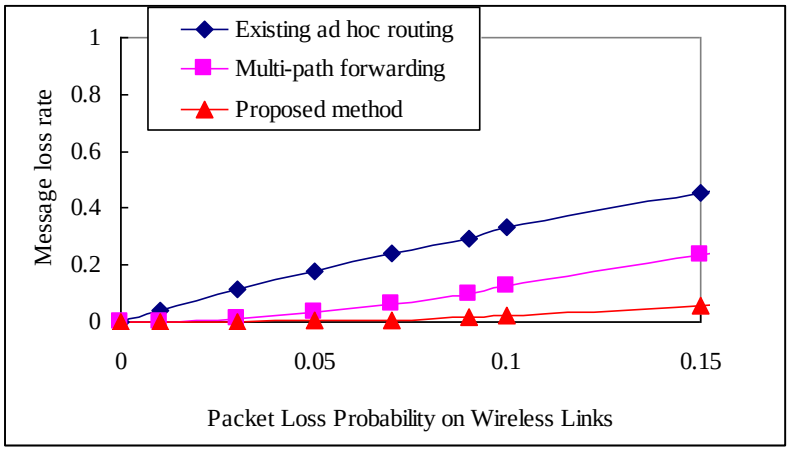


図 5.8　50 ノード時のメッセージ損失率(Message Loss Rate)

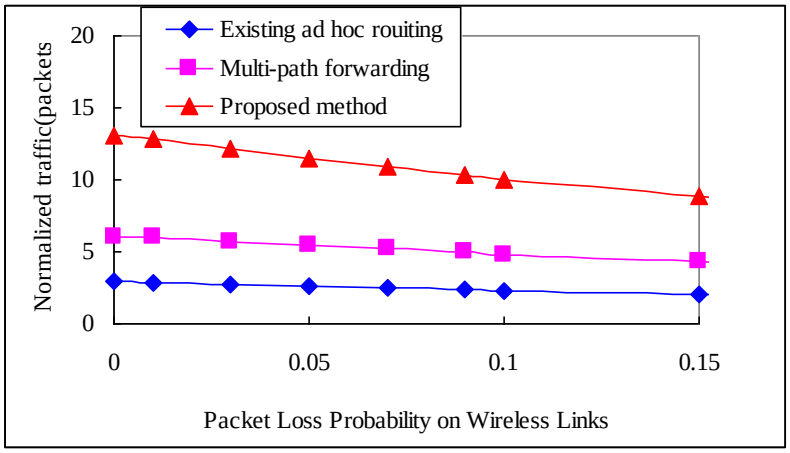


図 5.9　50 ノード時の正規化トラヒック量(Normalized Traffic)

図 5.10 及び図 5.11 は，50 ノード時のメッセージ損失率(Message Loss Rate)及び正規化トラヒック量(Normalized Traffic)を示しており，特定ノードに向けた隣接ノードへの転送数(Path)による効果を示している．Path=3 及び 4 については，メッセージ損失率(Message Loss Rate)及び正規化トラヒック量(Normalized Traffic)は，ほぼ同じ結果を示しており，Path=2 の場合が最も悪くなっている．これは，特定ノードに向けた隣接ノードへの転送数(Path)が 3 ノード以上の時は，中継ノードにおける重複した転送パケット検出による効果により，中継ノードでの緊急呼(Urgent messages)の転送による影響が制限されることによる．

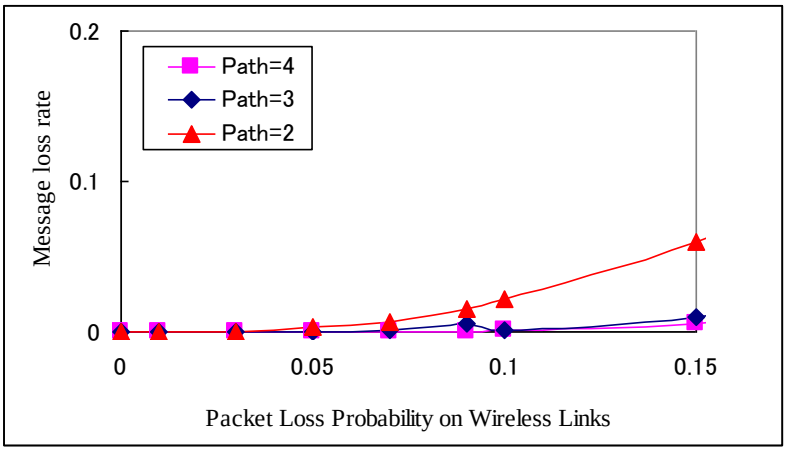


図 5.10　50 ノード時の正規化トラヒック量(Normalized Traffic)：Path 数による効果

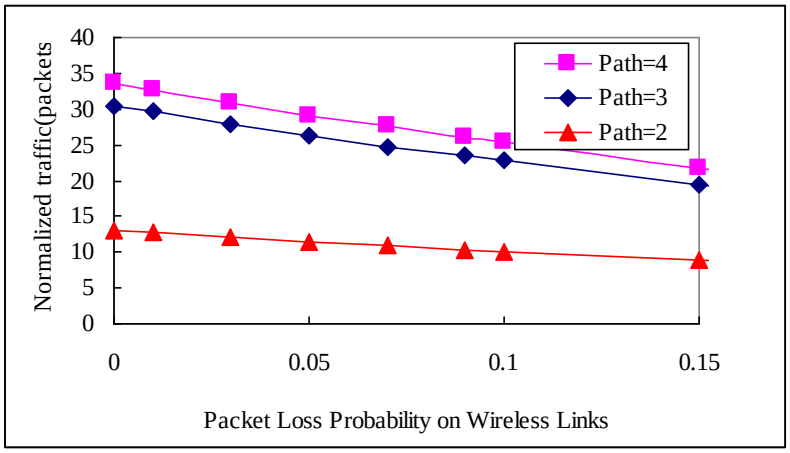


図 5.11　50 ノード時の正規化トラヒック量(Normalized Traffic)：Path 数による効果

図 5.12 及び図 5.13 は，方形エリアを固定した際のワイヤレスセンサネットワーク内のノード数(100，200，500，800，そして 1000 ノード)によるメッセージ損失率(Message Loss Rate)及び正規化トラヒック量(Normalized Traffic)を比較したものであり，ワイヤレスセンサネットワーク内のノード密度による特性を示している．特定ノードに向けた隣接ノードへの転送数(Path)は 2 である．図 5.12 及び図 5.13 より，すべてのケースにおいて同じ傾向を示している．これは，十分にセンサノードが密に配置される際には，ノード密度にかかわらず，緊急呼(Urgent messages)を通知するノードと特定ノード間の距離(平均ホップ数)は大きく変わらないためである．これより，複数パスによる同時転送手法は，緊急呼(Urgent messages)の転送の関して十分にスケーラブルな手法といえる．

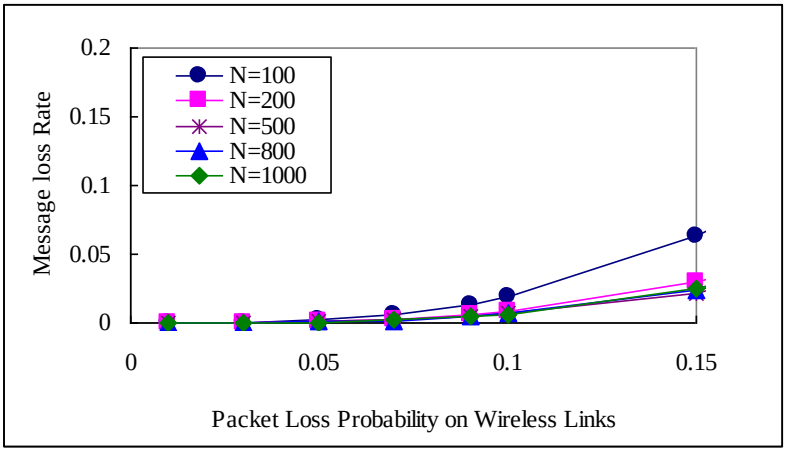


図 5.12 ノード数によるメッセージ損失率(Message Loss Rate)への影響

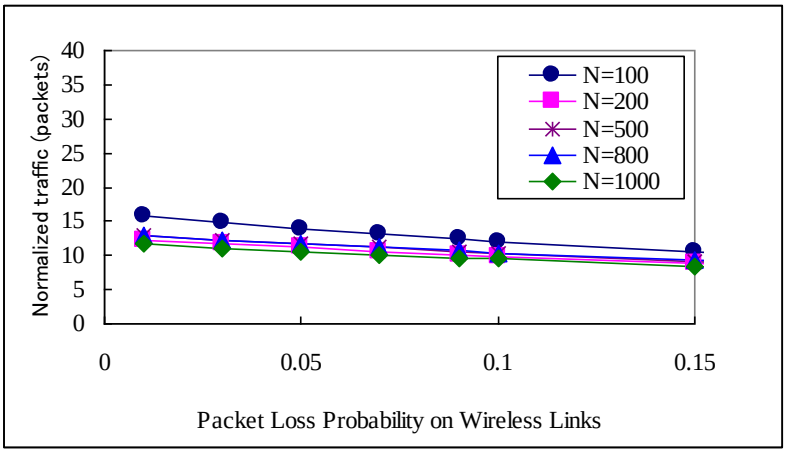


図 5.13 ノード数による正規化トラヒック量(Normalized Traffic)への影響

一方，図 5.14 及び図 5.15 は，ノード密度をほぼ一定とした際の結果であり，ノード数の増加に伴い，シミュレーションエリアも広くなっており，緊急呼(Urgent messages)を通知するノードと特定ノード間の距離(平均ホップ数)も増えている．図 5.14 及び図 5.15 より，ノード数の増大，すなわち平均ホップ数の増大に伴い，メッセージ損失率及び正規化トラヒック量も増大している．ここで，図 5.14 及び図 5.15 より，メッセージ損失率を所望の値以下の抑えるには，センサノードと特定ノード間の平均ホップ数を限定する必要があり，ワイヤレスセンサネットワーク構築時の課題となる．

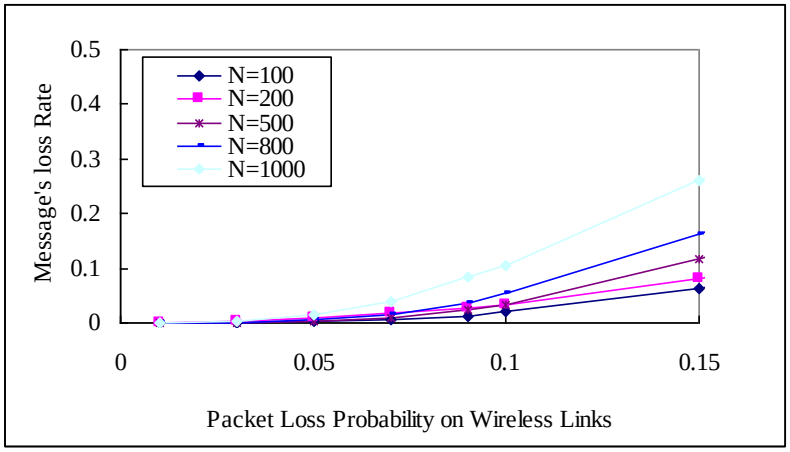


図 5.14 エリアサイズによるメッセージ損失率(Message Loss Rate)への影響

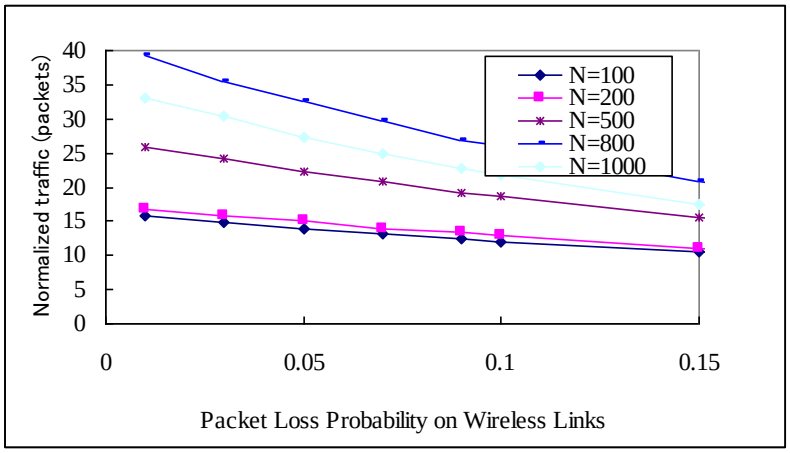


図 5.15 エリアサイズによる正規化トラヒック量(Normalized Traffic)への影響

以上のことから，複数パスによる同時転送手法は，大規模なワイヤレスセンサネットワークにおいて，無線リンク上のパケット損失率が大きくなる際にも，緊急呼(Urgent messages)の再送を考慮することなく，アプリケーションの観点から見た緊急呼(Urgent messages)のメッセージ損失率を小さく抑えることが可能であり，緊急呼(Urgent messages)が要求する緊急性及び確実性を満たすための有効な転送手法であることがわかる．例えば，シミュレーション結果では，パケット損失率が 0.1 の時においては，複数パスによる同時転送手法により既存の経路制御方式に対して 1/15 のメッセージ損失率の実現が可能となっている．

尚，緊急呼(Urgent messages)を転送するために必要となるトラヒック量は，各中継ノードにおける複数の次ホップへの転送に伴い増大しているが，緊急呼(Urgent messages)が要求する緊急性且つ確実性を優先した結果であり，実用上，問題ないと考える．また，メッセージ損失率の低減は，各ノードが中継する次ホップの数に依存するが，次ホップ数の増大に伴いトラヒック量の増大するため，無線リンクのパケット損失率に応じた最適な次

ホップ数の評価は今後の課題である．

また，複数パスによる同時転送手法では，確実な転送手法に基づく特定ノードへの通知によりアプリケーションレベルでの再送制御が不要となるため，緊急呼(Urgent messages)の通知に関する遅延削減につながる．このため，複数パスによる同時転送手法により，アプリケーションの観点から見て，複数パスによる転送に伴う通信トラヒックの微増を伴うが，低遅延で且つ高信頼に緊急性を要するメッセージの転送が可能となる．

5．5．無線センサノード上への実装及び評価

ここでは，無線センサノード上への複数パスによる同時転送手法の実装，及び無線センサノードを用いた実験環境での評価結果を示す．

5．5．1．　センサノード上への実装

複数パスによる同時転送手法を無線センサノードに実装した．使用した無線センサノードは，16 ビットの CPU，20K バイトのメモリ(RAM 領域)，及び IEEE 802.15.4 準拠の 2.4GHz 帯の無線インタフェースを持っている．また，組込みリアルタイム OS(μITORN)が載っている．ここで，Best-effort 型のメッセージに対しては，μITRON 上に DYMO アーキテクチャに基づく On-demand 型の経路制御方式を実装した．図 5.16 にネットワーク層におけるソフトウェアアーキテクチャを示す．“Urgent routing”と呼ぶ複数パスによる同時転送手法に対するソフトウェアモジュールが，On-demand 型の経路制御方式のソフトウェアモジュールと併行して IEEE 802.15.4 PHY/MAC レイヤの上位に実装される．ここで，“Urgent routing”は 2 つの機能，“N-th redundant route discovery”と“urgent forwarding”から構成される．“N-th redundant route discovery”は，特定ノードに対する N 個の冗長パスを確立・維持する．“urgent forwarding”は，緊急呼(Urgent messages)に対する経路テーブルを参照し，複数の隣接ノードに対して，受信した緊急呼(Urgent messages)を転送する．

図 5.17 はメッセージフォーマットを示す．メッセージ ID(message identifier)フィールドを使用して，On-demand 型の経路制御方式の制御メッセージ，複数パスによる同時転送手法に対する制御メッセージ，Best-effort 型のメッセージ，及び緊急呼(Urgent messages)を識別する．このメッセージ ID(message identifier)フィールドを使用すること

により，単一のワイヤレスセンサネットワークにおいて，無線センサノードは，Best-effort 型のメッセージと緊急呼(Urgent messages)に対する転送手法(Forwarding strategy)を適用することが可能となる．尚，今回の実装においては，メッセージ ID(message identifier) フィールドは，送信先アプリケーション ID と送信元アプリケーション ID の組合せより構成している．

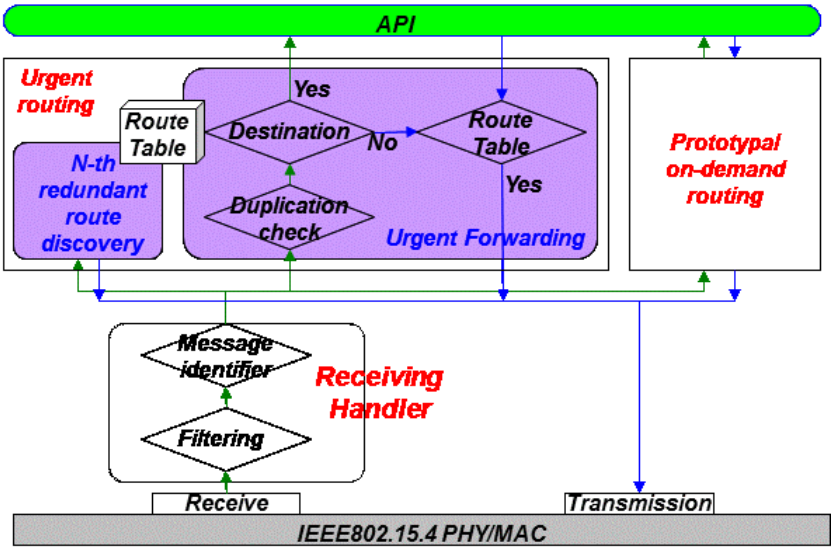


図 5.16　ネットワーク層におけるソフトウェアアーキテクチャ

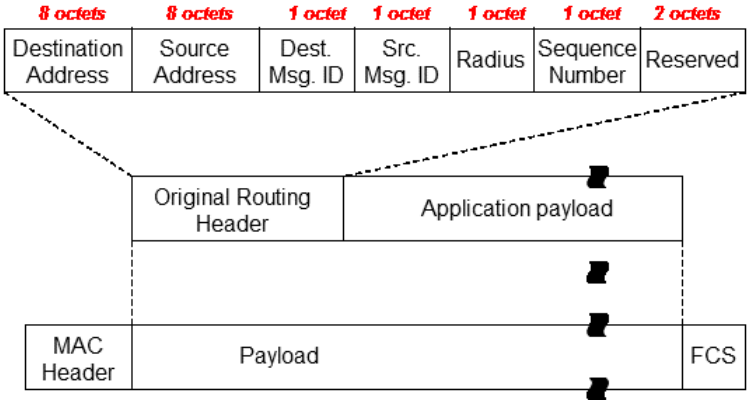


図 5.17　メッセージフォーマット

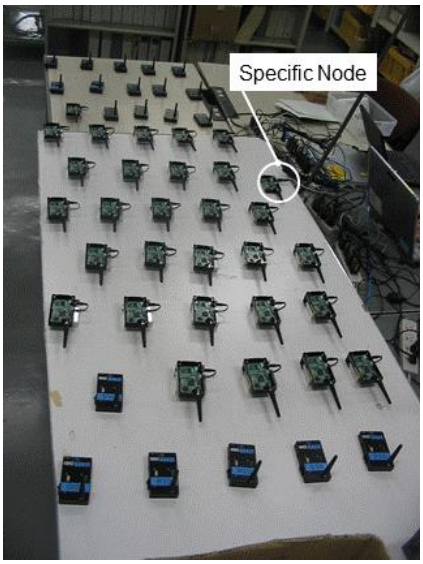


図 5.18　50 ノードからなる実験用ワイヤレスセンサネットワーク

5．5．2．　センサノードを用いた実験結果

図 5.18 に示すように 50 ノードからなるワイヤレスセンサネットワークを構築し，無線エラーが発生しやすい環境(Error-prone wireless links)にて，緊急呼(Urgent messages)と Best-effort 型のメッセージに対するメッセージ損失率(Message Loss Rate)を比較した．尚，性能評価に対して，トラヒックジェネレータ機能や評価用の無線リンクエミュレータ機能などのソフトウェアを併せて各無線センサノード上に実装している．トラヒックジェネレータ機能は，指定されたノードに対して，シーケンス番号を付加したパケットを繰り返し送信する機能を具備する．特定ノードでは，受信したパケット数を計測すると共に，シーケンス番号を基にメッセージ損失率(Message Loss Rate)を算出する．無線リンクエミュレータ機能は，無線リンクにおけるパケット損を擬似するために，各ノードの受信モジュール上に実装され，パラメータとして設定された確率に従い，受信パケットを廃棄する機能を具備する．上記に加えて，各無線センサノードは，論理構成マップと呼ぶテーブルを保持しており，設定された無線ノードとのみの通信を可能としている．これにより，実験室環境においても，マルチホップネットワークの構築を実現している．また，無線リンクエミュレータ機能及び論理構成マップにより，無線リンクの特性や他の無線システムの存在に依存することなく，複数パスによる同時転送手法の評価を可能としている．図 5.19 は，実験室環境における論理的なネットワーク構成，すなわち，論理構成マップによる隣接端末との接続性を示している．

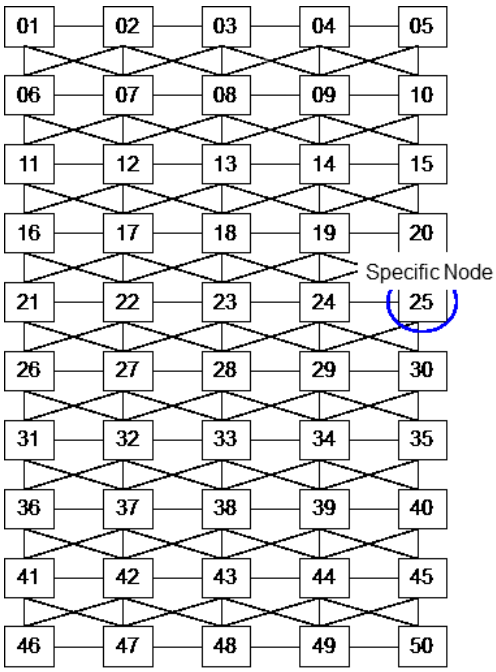


図 5.19 実験用ワイヤレスセンサネットワークの論理接続状況

図 5.20 は 50 ノードの環境における，Best-effort 型のメッセージと緊急呼(Urgent messages)に対するメッセージ損失率(Message Loss Rate)を示している．ここで，特定ノードに向けた隣接ノードへの転送数は，2 としている．メッセージ損失率(Message Loss Rate)は無線ノードが特定ノードに向けて周期的に 1000 メッセージを送信した際の，特定ノードにて受信したメッセージ数として測定している．図 5.20 において，緊急呼(Urgent messages)に対するメッセージ損失率(Message Loss Rate)は，全ての領域において，Best-effort 型のメッセージのメッセージ損失率に対して小さくなっている．さらに，例えば，無線リンクのパケット損失率が 0.09(9%)と非常に無線環境が劣悪な条件においても，緊急呼(Urgent messages)は特定ノードに通知されている．そして，緊急呼(Urgent messages)に対するメッセージ損失率(Message Loss Rate)は Best-effort 型のメッセージに対して，1/30 となっている．

実験室環境の評価結果より，複数パスによる同時転送手法は，無線リンクにおけるパケット損失率が高い状況においても，低いメッセージ損失率(Message Loss Rate)を実現可能であることが確認できる．そして，複数パスによる同時転送手法は，遅延や信頼性の制約のあるメッセージと Best-effort 型のメッセージに対して，同一のワイヤレスセンサネットワーク上での転送サービスを提供可能であることがわかる．

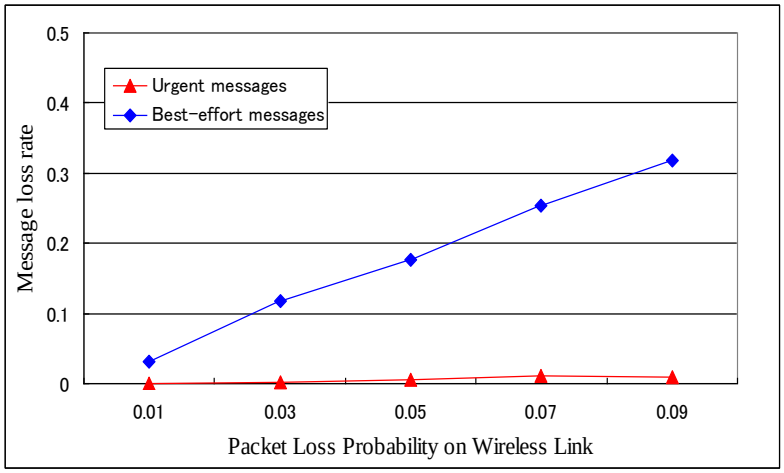


図 5.20　緊急呼(Urgent messages)と Best-effort 型メッセージに対するメッセージ損失率(message loss rate)の比較

5．6．むすび

本章では，ワイヤレスセンサネットワークにおいて緊急性且つ確実性を要求するメッセージの転送を実現するための複数パスによる同時転送手法(Multi-path and Simultaneous Forwarding Method)について説明し，コンピュータ・シミュレーション，及び無線センサノードを用いた実証実験による評価について述べた．

複数パスによる同時転送手法は，無線リンク上のパケット損失の発生を考慮し，各中継ノードが複数の次ホップとなるノードに向けてメッセージを転送することを特徴としており，コンピュータ・シミュレーションにより，無線リンク上のパケット損失率が大きい場合においても，アプリケーションの観点から緊急性且つ確実性を要求するメッセージに対するメッセージ廃棄率を低減可能であることを示した．

さらに，複数パスによる同時転送手法を無線センサノード上に実装し，実験室環境において論理的なネットワークを構築し，複数パスによる同時転送手法の有効性を確認した．

今後は，無線リンク上のパケット損失率に対して各中継ノードが転送する次ホップ数の最適化や次ホップ数に応じたトラヒック量評価などの課題が考えられる．

第6章　ワイヤレスセンサネットワークの安定運用に向けた取組み

6．1．まえがき

前章までで，確実に且つ安定してデータを収集するための頑強なデータ収集向けワイヤレスセンサネットワークを構築するための経路メンテナンス手法，及び単一のワイヤレスセンサネットワーク上にて定期的なデータ収集に加えて緊急通報のサービス提供を可能とする個別のセンサノードから緊急性を要するメッセージを特定のノードに確実に且つ迅速に転送するためのデータ通知手法について述べた．しかしながら，ワイヤレスセンサネットワークが広く普及するためには，頑強なワイヤレスセンサネットワークを構築する，及びワイヤレスセンサネットワーク上で複数のサービスを提供可能とするだけでなく，構築したネットワークを安定して運用することも重要となる．ここで，ネットワークの安定運用を意識した取組みとしては，安定した経路の選択[55][56]や経路の公平性を向上させる経路選択[57][58]などの取組みも見られる．しかしながら，経路探索において各ノードが自律的に経路を選択するための経路評価メトリックに対する議論に留まっている．

また，これまでの検討は，単一種類のセンサノードより構成されるワイヤレスセンサネットワークを前提としていた．しかしながら，近年の無線デバイスの普及に伴い多種多様なセンサノードが出現しており，各センサノードが持つメモリ量などについても導入・設置時期や用途に応じて異なることが一般的となっている．すなわち，ワイヤレスセンサネットワークを単一種類のセンサノードだけで構築するのではなく，設置場所や用途に応じてセンサノードを導入することが可能であり，複数種類のセンサノードからなるワイヤレスセンサネットワークを考えることが重要となる．

ここで，経路制御方式に関わるアルゴリズムについては，ネットワークの性能に大きな影響を与える．すなわち，複数種類のノードから構成されるネットワークと単一種類のノードから構成されるネットワークに対する経路制御に関わるアルゴリズムは大きく異なるべきである． 例えば，CPU やメモリ量に大きな制約を持つノードを対象に設計された方式を，よりリソースがリッチなノードに適用する場合，リッチなノードの観点からはネットワーク性能の低下につながる．一方で，リソースがリッチなノードを対象に設計された

方式では，CPU やメモリ量に大きな制約を持つノードでは動作できず，ネットワークの分断などにつながる可能性がある．

本章では，ネットワーク内に複数種類のノードが存在することを想定した経路制御方式の紹介を行うと共に，リソースがリッチなノードを有効に活用する経路制御方式の一例として経路集約手法を提案する．

6．2．複数種類のノードの存在を前提とした経路制御方式

AODV などの従来の経路制御方式では，単一種類のノードからなるネットワークを前提としており，各ノードが保持するメモリ量が異なるなどの複数種類のノードが存在する時の経路探索については十分に考慮されていない．また，RPL においては，各ノードの持つ CPU やメモリ量などのリソースを考慮し 4 つの動作モードを定義しているが，ワイヤレスセンサネットワークを構成する全てのノードは，根となるノードと同じ動作モードで動作する必要がある．尚，[59]では，RPL において複数の動作モードが混在する状況下で，下り方向のデータパケットの転送を実現する拡張を提案しているが，複数の動作モードが混在する際の下り方向の経路の確立手段については触れられていない．

このような中，RAM-RPL (Resource Aware adaptive Mode RPL)[60]では，複数種類のノードからなるワイヤレスセンサネットワークにおいて，各ノードの持つリソースに応じた適応型の動作モードの選択，及び動作モードが混在した際の経路探索及びパケット転送を実現している．すなわち，RAM-RPL では，メモリ量などの持続性のリソースとバッテリ残量などの非持続性のリソースに分類し，リソース残量を反映した経路探索のための新しいメトリックを導入することにより，上り方向及び下り方向のパケット転送に対してリソースに応じた経路探索メカニズムを示している．これにより，ネットワークが稼動している中においても，各ノードの残リソースに応じた経路の構築や経路に関わる情報の圧縮，通信オーバヘッドの削減を図っている．

さらに，H-RPL (resource aware hierarchical RPL)[61]では，RAM-RPL に対して，経路制御に必要となるメモリ量やバッテリ残量などから導出される余命見積り，隣接ノードのリソース量などを反映した動的な動作モードの選択による改善を示している．また，動作モードを基にした階層化されたネットワークの構築を示している．

6．3． 経路集約によるネットワークの安定化

次に，同一方向に向けた経路を自律的に集約する経路集約手法について述べる．

これまでの章で述べたように，近年の無線テクノロジーや電子デバイスの進展に伴い，低コストにより構築可能なワイヤレスセンサネットワークに対する関心が高まっている．ワイヤレスセンサネットワークは，センシングやコンピューティング，無線通信の機能を持つセンサノードよりなるネットワークであり，モニタリング等を必要とするエリアに任意に構築されるアドホックネットワークである．ここで，ワイヤレスセンサネットワークの構築においては，一般にセンサノードは，そのリソースに制約を持つため，種々の制約条件のもとで研究開発がなされてきた．また，近年では，あらゆる人やモノがネットワークに繋がり，いつでも，どこでも，誰にでも欲しいサービスが利用できるユビキタスネット社会の実現に向けて，安全・安心な社会の実現，及び幅広い活動における快適性・生産性・効率性の向上に向けた研究・開発が多方面で行われている．

このように，ワイヤレスセンサネットワークは，多様なアプリケーションにおいて利用される重要なテクノロジーとなっている．しかしながら，ユビキタスネット社会の実現に向けては，様々なノードの収容，双方向通信の提供，及びスケーラビリティの実現に向けた議論が必要である．ここでは，各ノードが保持する経路テーブルの増大に伴い，同一方向に向けた経路を自律的に集約する経路集約手法を提案し，試作評価により提案手法の有効性を示す．

6．3．1． 大規模なツリー型ネットワーク構築の課題

まず，大規模なツリー型のネットワークを構築する際の課題について述べる．ワイヤレスセンサネットワークにおいては，一般に，ネットワーク上の各センサノードよりゲートウェイやデータ収集ノードといった特定のノードに向けてモニタリング情報が通知される．この場合，ゲートウェイ或いは特定ノードやその周辺に位置するノードに経路が集中することになり，ゲートウェイ或いは特定ノードやその周辺に位置するノードが保持すべき経路情報が増大する．そのため，メモリリソース等に大きな制約を持つセンサノードにとっては経路情報の増大が大きな問題となる．例えば，本論文でターゲットとするデータ収集

のようなアプリケーションでは，数百台規模のセンサノードよりゲートウェイ或いは特定ノードへ温度や照度等のモニタリング情報を通知しており，既存の経路制御方式では，ゲートウェイ或いは特定ノードの周辺ノードにおいて，数十～百程度の経路情報を保持することが求められる．

また，On-demand 型の経路制御方式を想定する際には，ノード間の経路確立のために経路探索要求メッセージをネットワーク内にフラッディングする必要があり，大規模なワイヤレスセンサネットワークにおいては，各ノードからの経路探索要求メッセージがネットワーク内でフラッディングされ，多大の帯域を浪費するといった問題がある．さらに，様々なセンサノードが存在するため，各センサノードの持つリソース状態や稼動状況に応じて，経路制御が行われることが求められる．

6．3．2．　経路集約手法

ここでは，6．3．1．節で示す課題に対して，経路探索時に中継ノードにおいて，自律的に経路を集約する経路集約手法を提案する．

提案手法は，以下の 2 つの機能を持つ．

(1)同一方向に向けた経路の集約(Route Aggregation)(図 6.1)

(2)集約経路を用いた経路探索(Route Discovery based on Aggregated Route)(図 6.2)

上記機能により，経路集約されたノード間に位置する中継ノードにおいて保持する経路情報の削減，及び集約された経路を利用することによる経路探索に伴うオーバヘッドの削減を実現する．また，提案手法を実装するノード間で経路集約を実施することにより，中継ノードにおける拡張が不要であり，多様なノードの収容が可能となる．

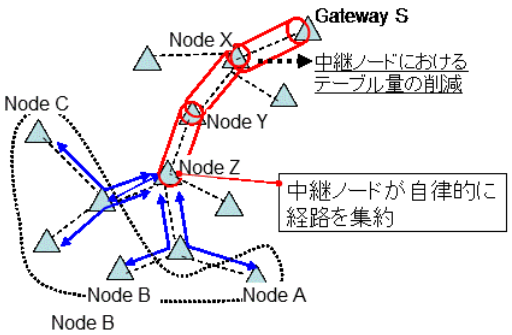


図 6.1　経路集約(Route Aggregation)

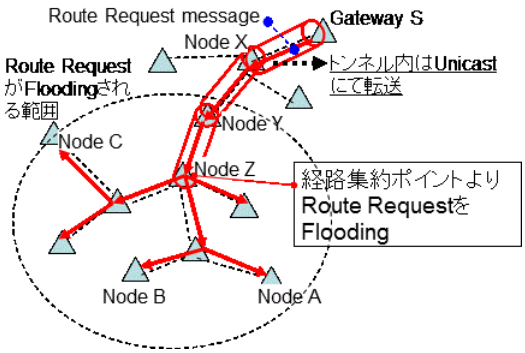


図 6.2 集約した経路に基づく経路探索手順(Route Discovery based on Aggregated Route)

(1)同一方向に向けた経路の集約(経路集約：Route Aggregation)

経路集約は，提案手法を実装するノードが，一定数以上の同一方向に向けた経路が存在する際に，同一方向の相手先ノードとの間で経路を集約する機能である．ここで，DYMO などの On-demand 型の経路制御方式を例として動作概要を説明する．この経路集約の機能では，該当ノードは，経路探索における応答メッセージ(Route Reply message)の転送時に，一定数以上の Route Reply message の送信元への経路が存在すると，集約する経路の情報を含む経路集約メッセージ(Aggregation Request message)を Route Reply message に相乗りさせて通知する．そして，Aggregation Request message を受信するノードは，その送信元ノードに対する片方向の集約経路を作成するため，Aggregation Acknowledge message を応答する．また，Aggregation Request message を受信するノード(発ノード)は，集約経路の作成後，指示されたノードへのメッセージの転送については集約経路を用いて転送する．ここで，集約経路内の転送は，集約経路の端点を送受信ノードとする通常のメッセージとして転送されるため，集約経路上の中継ノードにおける経路情報に関するテーブル量の削減が可能となる(図 6.3)．すなわち，図 6.3 では，ノード G はノード A から図中に記載されていないノード F やノード H などに向けた経路を保持する状態で，新たにノード J に向けた経路探索の要求を受信している．ここで，新しい経路を追加する際に規定以上の同一方向に向けた経路が存在することより，ノード G はノード A との間で経路の集約を判断し，経路探索応答(Route Reply message)に経路の集約に関わる情報を相乗りさせている．

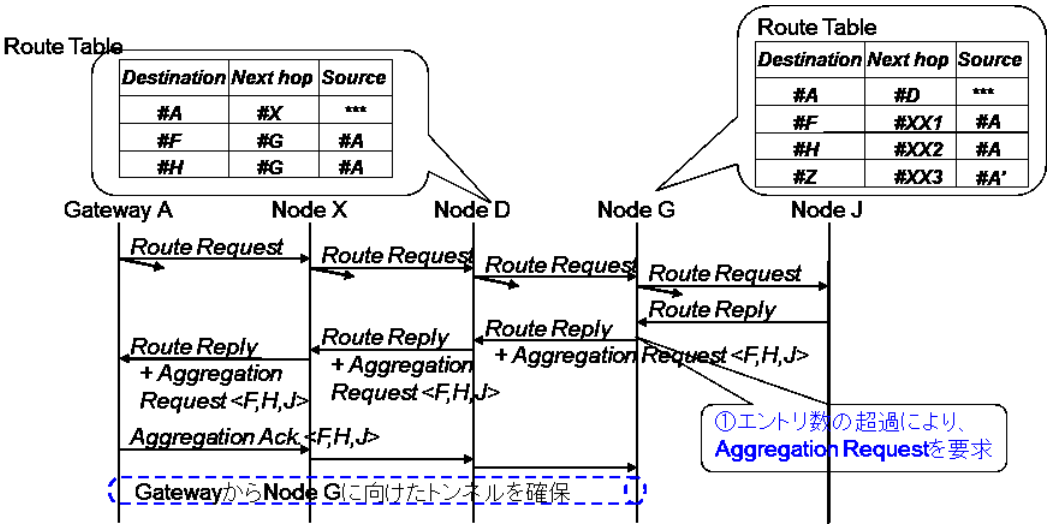


図 6.3 経路集約のためのメッセージシーケンス

(2)集約経路を用いた経路探索(Route Discovery based on Aggregated Route)

集約経路を用いた経路探索は，集約経路の送信元となるノード(発ノード)が，集約経路を介してメッセージを転送する転送先ノードに向けた経路探索において，集約経路を用いて Route Request message を集約経路の端点までユニキャストにて転送し，集約経路の端点より転送ホップ数の制限を持つ Route Request message をフラッディングする機能である．この機能により，Route Request message がフラッディングされる範囲を大幅に限定することが可能であり，経路探索に伴うトラヒック量の削減が可能となる(図 6.4)．すなわち，図 6.4 では，ノード A がノード J に対して経路メンテナンスなどにより経路の再探索を行う例を示しており，ノード J がノード A とノード G 巻の集約経路の先に存在するため，ノード A からノード G まではユニキャストにて経路探索要求(Route Request message)が転送されている．

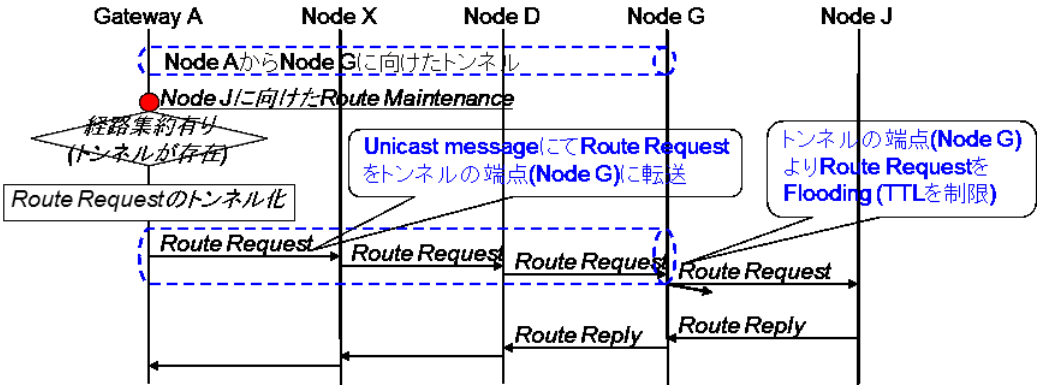


図 6.4 集約経路を用いた経路探索のためのメッセージシーケンス

6．3．3．　経路集約手法の実装

5．5．節と同様に，16 ビット CPU，20KByte のメモリ(RAM)，そして，IEEE802.15.4 準拠の 2.4GHz 帯の無線インタフェースを備えているセンサノード上に経路集約手法を実装した．ここで，センサノードには，OS として組込みリアルタイム OS である uITRON が搭載されており，OS 上に実装される On-demand 型の経路制御方式により，ワイヤレスセンサネットワークが構築可能となっている．図 6.5 は，ソフトウェア構成を示している．提案手法は，ネットワーク層である On-demand 型の経路制御方式(Prototypal On-demand Routing)への拡張として実装されている．尚，集約した経路情報を管理するためのテーブル(Binding Table)を定義しており，メッセージの送信時には最初に Binding Table を参照する．ここで，Binding Table は，集約先のノード情報に対して，集約経路を介して転送するノード情報をリストとして持っている．

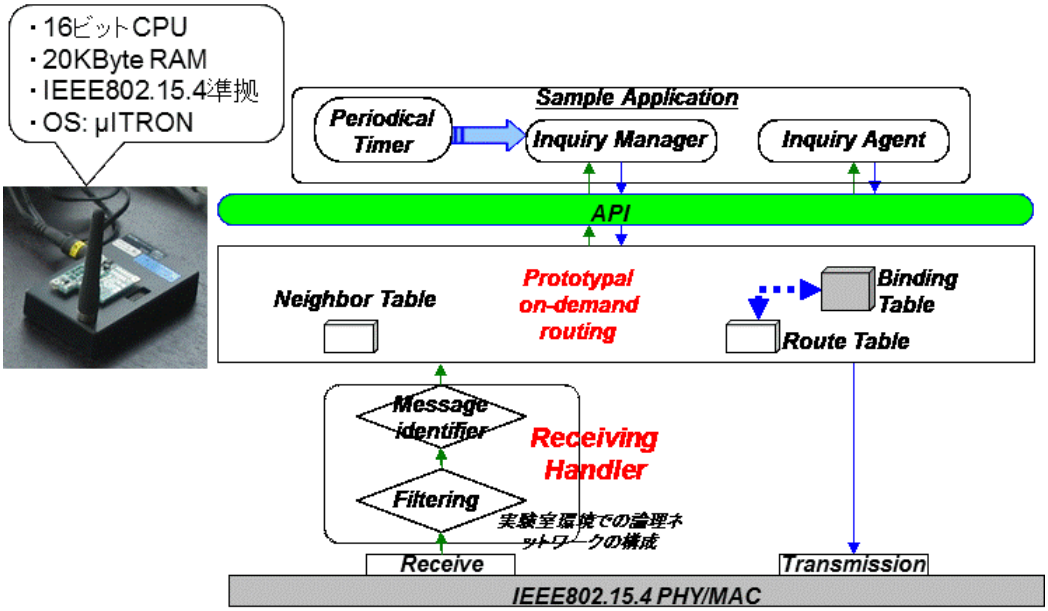


図 6.5　経路集約手法の実装

6．3．4．　経路集約手法の評価

センサノード上に実装した提案手法の動作を確認するため，50 台のセンサノードからなるワイヤレスセンサネットワークを構築し，動作検証を行った(図 6.6)．尚，実験室環境においては，全てのセンサノードが単一の無線通信範囲内に収まることもあるため，各セン

サノードに論理構成マップと呼ぶテーブルを定義し，論理的に隣接に位置するノードとのみ通信可能となるように制限している．

上記環境において，ゲートウェイとなる特定ノード(Sink node)からネットワーク内の各ノードに対して周期的に問合せを行うアプリケーションにて，経路集約手法の適用の有無による各ノードで持つ経路情報に関するテーブル量，及び特定ノードからの経路探索に伴うトラヒック量の比較を行った．図 6.7 は，経路集約手法を全ノードに適用時，一部のノードに適用時，及び既存の On-demand 型の経路制御方式適用時における Sink node からの距離(ホップ数)に応じた各ノードの持つ経路情報に関するテーブルの平均エントリ数を示している．Sink node から 1 或いは 2 ホップに位置するノードにおいては，経路集約手法の適用により大幅なエントリ数の削減が可能であることがわかる．一方，図 6.8 は，Sink node からの距離(ホップ数)に応じた各ノードが転送する Route Request message の平均数を示しており，経路集約手法の適用により各ノードにおける Route Request message の転送数が削減されている．

また，図 6.7 及び図 6.8 において，経路集約手法を全ノードに適用した際と一部のノードに適用した際で大きな差が生じておらず，部分的にも経路集約手法を実装したノードを配置することにより，提案手法による効果を得ることが可能である．

尚，部分的に配置するノード数やノードの位置に対する効果については，今後の検討課題である．

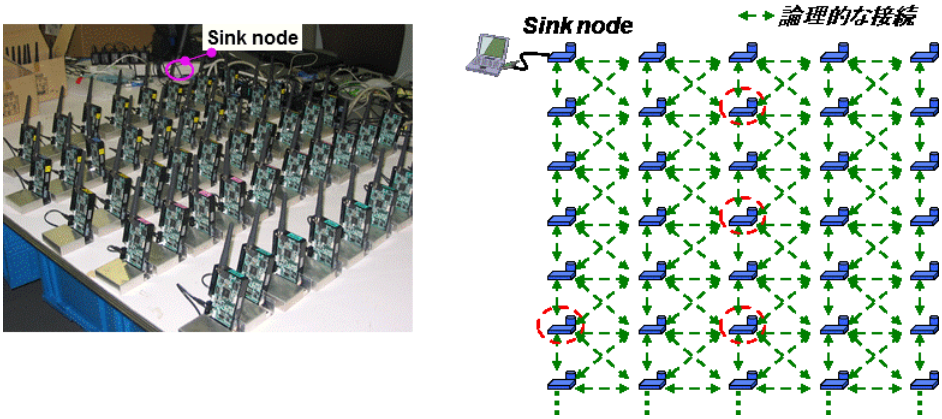


図 6.6　経路集約手法を評価するための 50 ノードからなるネットワーク

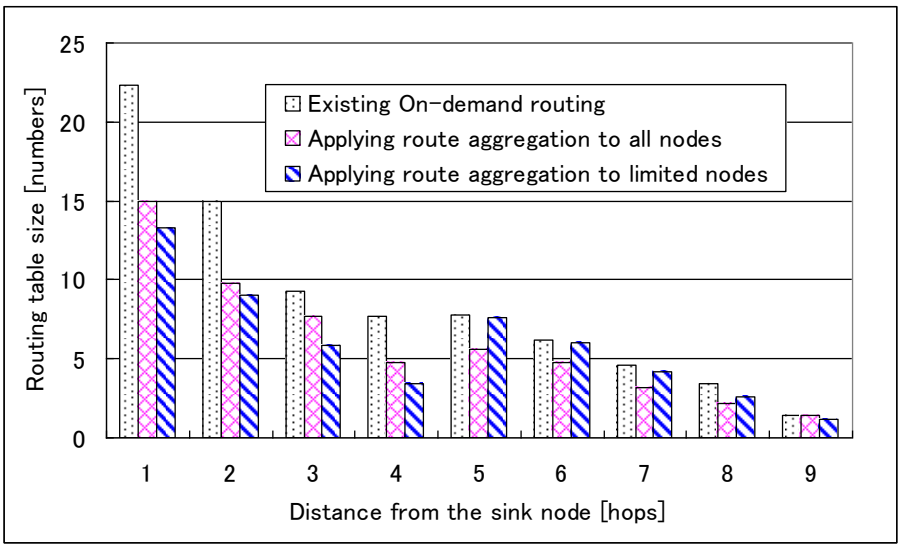


図 6.7　経路集約手法の評価(経路テーブル)

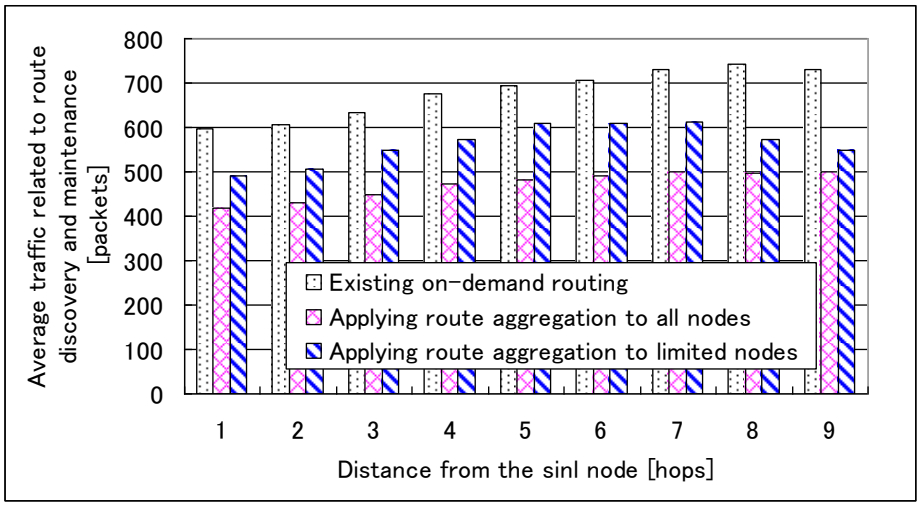


図 6.8　経路集約手法の評価(経路探索手順に関わるトラヒック量の比較)

6．3．5．　経路集約手法に対する考察

メモリリソースに大きな制約を持つセンサノードよりなる大規模なワイヤレスセンサネットワークの実現に向けて，同一方向に向けた経路を自律的に集約する経路集約手法を提案し，試作評価によりその有効性を示した．提案手法は，経路探索時に中継ノードにおいて,自律的に経路を集約する機能と集約経路を用いた経路探索機能よりなる手法であり，中継ノードで持つ経路情報に関するテーブル量の削減と経路探索に伴うオーバヘッドの削減を実現している．

試作評価により，50 ノードからなるセンサネットワークを構築し，特定ノードより各ノードへの問合せに基づきデータを収集するアプリケーション・シナリオのもと，提案手法により，各ノードの持つ経路情報に関するテーブル量の削減，及び経路探索に伴うオーバヘッドの削減を確認した．

6．4．むすび

本章では，ワイヤレスセンサネットワークの安定運用に向けた取組みとして，単一種類のセンサノードより構築されるネットワークを想定した従来の経路制御方式に対して，センサノードが保持する CPU やメモリ量が異なる複数種類のノードより構築されるネットワークにて，各センサノードの持つリソース量を考慮した経路制御方式について説明するとともに，中継ノードにおける経路テーブル量の削減を可能とする同一方向に向けた経路を効率的に集約する手順について述べた．

近年の無線デバイスの進展により多様なセンサデバイスが出てきており，複数種類のノードより構成されるワイヤレスセンサネットワークが一般的になりつつある．また，単一種類のノードより構築されたワイヤレスセンサネットワークにおいても，ネットワーク運用中におけるノード故障などによりセンサノードの取替えが想定される．この場合，新規に設置されるノードは他ノードに比べてバッテリ残量が多い，或いはセンサデバイスの進化に伴いより多くのメモリ量を持つことなどが想定され，複数種類のノードより構築されるワイヤレスセンサネットワークと同じように，各センサノードの持つリソース量に応じた経路制御方式が適する．

このように，今後は複数種類のセンサノードよりなるワイヤレスセンサネットワークが一般的になると考えられ，本章で述べた各センサノードの持つリソース量に応じて適応的に動作モードを変更しネットワークを構築する経路制御方式，或いは各ノードの経路テーブル量に応じて同一方向の経路を集約する経路集約手法はネットワークの安定した運用の実現に有効である．

第7章　結論

本論文では，広域なエリアに跨って配置される無線センサノードが保持する情報を，遠隔のサーバにて定期的に収集するデータ収集システムの構築を第一の目的として，頑強なワイヤレスセンサネットワークを構築するとともに，Best-effort による定期的なデータ収集に加えて，同一のワイヤレスセンサネットワークにてセンサノードが検出する異常情報を緊急且つ確実に特定ノードに通知するデータ転送手法について検討を行った．また，ワイヤレスセンサネットワークの安定した運用に向けて，多種多様なセンサノードからなるワイヤレスセンサネットワークでの経路制御方式について検討を行った．まず，データ収集の観点から見て，ネットワーク安定性を向上させる経路メンテナンス手法を提案した．続いて，緊急性を要するメッセージの発生は稀であるとの前提のもと，緊急性且つ確実性を求めるメッセージを特定のノードに対して転送するためのデータ通知手法を提案した．そして，ネットワークの安定運用に向けて，同一方向に向けた経路を自律的に集約し，通信オーバヘッドを削減する経路集約手法を提案した．各章で得られた結果は以下の通りである．

第 4 章では，頑強なデータ収集向けワイヤレスセンサネットワークの構築に向けて，安定したデータ収集の観点からネットワーク安定性を向上させるために，経路の公平性を向上させる経路メンテナンス手法について検討した．データ収集(アプリケーション)の特性や無線通信特性のダイナミック性を考慮した評価指標として，無線リンク障害発生時のデータ到達率を導入し，導入した無線リンク障害発生時のデータ到達率により確実なデータ収集が可能となることを確認した．また，導入した指標である無線リンク障害発生時のデータ到達率は，パケット数の削減及びデータ収集に要する時間の短縮に寄与する指標であることを示した．

第 5 章では，単一のワイヤレスセンサネットワーク上にて定期的なデータ収集に加えて他のサービスの提供を可能とするために，個別のセンサノードから緊急性を要するメッセージを特定のノードに確実に且つ迅速に転送するためのデータ通知手法について検討した．緊急性且つ確実性を要求するメッセージの発生頻度は稀であるとの前提のもと，無線リンク上のパケット損失の発生を考慮し，各中継ノードが複数の次ホップとなるノードに向けてメッセージを転送する複数パスによる同時転送手法を示し，無線リンク上のパケット損失率が大きい場合においても，アプリケーションの観点から緊急性且つ確実性を要求するメッセージに対するメッセージ廃棄率を低減可能であることを示した．また，複数パスに

よる同時転送手法を無線センサノード上に実装し，実験室環境において論理的なネットワークを構築し，複数パスによる同時転送手法の有効性を確認した．

第 6 章では，安定したネットワークの運用に向けた取組みとして，複数種類のセンサノードよりワイヤレスセンサネットワークが構築される状況を考慮し，センサノードが持つリソース量に応じて各センサノードが動作モードを決定し，複数の動作モードの混在を可能とする経路制御方式を議論するとともに，同一方向に向けた経路を効率的に集約することにより，中継ノードにおける経路テーブル量や通信オーバヘッドの削減を可能とする経路集約手法について検討した．そして，経路探索時に中継ノードにおいて自律的に経路を集約する機能と集約経路を用いた経路探索機能より，中継ノードで持つ経路情報に関するテーブル量の削減と経路探索に伴うオーバヘッドの削減が可能であることを確認した．また，コンピュータ・シミュレーションによる評価に加えて，試作評価により，50 ノードからなるセンサネットワークを構築し，特定ノードより各ノードへの問合せに基づきデータを収集するアプリケーション・シナリオのもと，各ノードの持つ経路情報に関するテーブル量の削減，及び経路探索に伴うオーバヘッドの削減を確認した．

以上，各章に対するまとめを概観した．本論文では，ワイヤレスセンサネットワークの構築について，自律分散型のネットワークに対して集中制御による経路メンテナンスを導入することにより，確実なデータ収集を可能とするネットワークの構築が可能となった．また，ワイヤレスセンサネットワーク上で特定の要求を持つパケットに対して，異なる経路構築手法や転送手法を導入することにより，単一のワイヤレスセンサネットワーク上の緊急性を要するメッセージの通知が可能となった．さらに，複数種類のセンサノードからなるワイヤレスセンサネットワークについて，同一方向に向けた経路を自律的に集約する手順により，経路メンテナンスにおける通信オーバヘッドの削減が可能となり，安定したネットワークの運用が見込まれるようになった．これらにより，データ収集などのアプリケーションの観点から頑強なワイヤレスセンサネットワークの構築が実現可能となった．

一方，環境モニタリングなどでのワイヤレスセンサネットワークについては，バッテリ駆動の無線センサノードによる長期間の稼動が求められており，低消費電力化やバッテリ残量に応じた動作などの検討が残されている．また，M2M/IoT により数多くの無線デバイスが至る所に配置される世界が予想されている．その際には，無線リソースの有効活用或いは干渉回避なども含めた検討が必要となる．今後の課題としては，ワイヤレスセンサネットワークの真の普及に向けて，上記のような低消費電力化や無線干渉回避を含めた検討により，安定且つ継続的なネットワークの運用実現に向けた検討があげられる．

▪ 謝辞

本論文をまとめるに当たり，熱心に的確な御指導を下さった東京工業大学工学院　山岡克式准教授に深く感謝致します．また，本論文について貴重なご教示を頂きました東京工業大学工学院　植松友彦教授，府川和彦教授，山田功教授，東京工業大学学術国際情報センター　北口善明准教授に感謝致します．

三菱電機株式会社情報技術総合研究所に勤務されていた際，本研究の遂行ならびに本論文の取りまとめの機会を与えてくださいました金沢工業大学　横谷哲也教授に謹んで感謝の意を表します．

本研究を進めるに当たり，日頃様々な場面でご協力下さいました三菱電機株式会社情報技術総合研究所の皆様に感謝いたします．

最後に，親愛なる家族の深い理解と協力に感謝します．

▪ 参考文献

[1] L.M. Borges, F.J. Velez, and A.S. Lebres, “Survey on the Characterization and Classification of Wireless Sensor Network Applications,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.16, issue 4, pp.1860--1890. April, 2014.

[2] S.K. Singh, M.P. Singh, and D.K. Singh, “Routing Protocols in Wireless Sensor Networks – A Survey,” International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSES), vol.1, no.2, pp.63--83, November, 2010.

[3] N.A. Panatazis, S.A. Nikolidakis, and D.D. Vergados, “Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey,” IEEE Communications Survey & Tutorials, vol.15, issue 2, pp.551--591, May, 2013.

[4] 石橋, 山岡, “ワイヤレスセンサネットワークにおけるネットワーク安定性向上のための経路メンテナンス手法の提案,” 信学会論文誌 B, Vol.J100-B, No.5, pp.411--424, May, 2017.

[5] K. Ishibashi, K. Takada, and M. Yano, “Proposal and Implementation Study of Forwarding Method for Urgent Messages on a Wireless Sensor Network,” IEICE Transactions on Communications, Vol. E90-B, No. 12, pp.3402--3409, December, 2007.

[6] 大橋, 大槻, “ユビキタスセンサネットワーク,” 電子情報通信学会誌, Vol.95, No.9, pp.772--778, September, 2012.

[7] V. Potdar, A. Sharif, and E. Chang, “Wireless Sensor Networks: A Survey,” 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshop (AINA-09), pp.636--643, May, 2009.

[8] V. C. Gungor, and G. P. Hancke, “Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 10, pp.4258--4265, October, 2009.

[9] P. Kulkarni, P, S. Gormus, Zhong Fan, and B. Motz, “A Mesh-Radio-Based Solution for Smart Metering Networks,” IEEE Communications Magazine, Vol. 50, Issue 7, pp.86--95, July, 2012.

[10] 泉井, 渋谷, 浅井, “スマートグリッドとセンサネットワーク,” 信学会論文誌 B, Vol.J95-B, No.11, pp.1378--1387, November, 2012.

[11] 泉井, 石橋, "スマートグリッドにおけるセンサネットワーク技術の活用," 電気評論, 第 99 巻夏季増刊号, pp.43--48, June, 2014.

[12] 石橋,"無線マルチホップネットワーク技術開発への取り組み,"第 30 回信学会 IN/NS 研究ワークショップ招待講演, pp.33--42, March, 2014.

[13] 稲坂, 平岡, 斎藤,“センサネットワーク,” 三菱電機技報, Vol.80, No.9, September, 2006.

[14] 石橋, 高田, 田村, 矢野,“アドホックルーティング技術,” 三菱電機技報, Vol.80, No.9, September, 2006.

[15] 森川, "総論：ユビキタスネットワークから M2M へ," 電気評論, 第 99 巻夏季増刊号, pp.7--11, June, 2014.

[16] 横山,“よりスマートなグリッドの構築に向けて(I),” 電気学会誌, vol. 130, no. 2, pp94--97, February, 2010.

[17] 横山, “よりスマートなグリッドの構築に向けて(II),” 電気学会誌, vol. 130, no. 3, pp163--167, March, 2010.

[18] 百瀬, “スマートグリッドと ICT[I]：米国におけるスマートグリッド標準化動向,” 電子情報通信学会誌, vol.94, no.12, pp1067--1071, December, 2011.

[19] 富永, 松田, 野崎, “スマートグリッドと ICT[II]：スマートグリッドで加速する M2M の技術動向,” 電子情報通信学会誌, vol.95, no.1, pp56--61, January, 2012.

[20] 小島, 古塩, 中村, “マイクログリッド向け需給制御機能の開発と実証検討,” 電学論（B）, vol.128, no.2, pp.429--436, February, 2008.

[21] G. Wu, S. Talwar, K. Johnsson, N. Himayat, and K. D. Johbson,“M2M: From Mobile to Embedded Internet,” IEEE Communications Magazine, pp.36--43, April, 2011.

[22] 藤田, 後藤, 小池,“M2M アーキテクチャと技術課題,” 電子情報通信学会誌, Vol.96, No.5, pp.305--312, May, 2013.

[23] “oneM2M Use cases collection,” TTC 技術レポート, TR-M2M-0001v0.0.5, 2014.

[24] “Machine-to-Machine Communications (M2M); Use cases of M2M applications for eHealth,” ETSI TR 102 732 v1.1.1 September, 2013.

[25] “スマートセンシング,” 日経 BP 社, November, 2013.

[26] S. Obana, B. Komiyama, K. Mase, "Test-Bed Based Research on Ad Hoc Networks in Japan," IEICE Transactions on Communications, vol. E88-B, no.6, pp.3508--3514, September, 2005.

[27] 松井, "アドホックネットワークの実用化に向けた課題と実用化動向,"日本信頼性学

会誌, Vol.34, No.8, pp.532--539, November, 2012.

[28] 石橋, “三菱電機におけるアドホックネットワークへの取組み, “アドホックネットワーク・コンソーシアム設立記念シンポジウム, May, 2004.

[29] 間瀬, “アドホックネットワーク・無線メッシュネットワークの社会応用を目指して, “ 電子情報通信学会誌, Vol.99, No.8, pp.852--855, September, 2016.

[30] S. J. Isaac, G.P. Hancke, H. Madhoo, and A. Khatri, “A Survey of Wireless Sensor Network Applications from a Power Utility’s Distribution Perspective,” IEEE Africon 2011, September, 2011.

[31] J. Wang, and V. C. M. Leung, “A Survey of Technical Requirements and Consumer Application Standards for IP-based Smart Grid AMI Network,” International Conference on Information Networking (ICOIN), January, 2011.

[32] A. Boukerche, B. Turgut, N. Aydin, M. Ahmad, L. Bölöni, and D.Turgut, “Routing protocols in ad hoc networks: A survey,” Computer Networks, Vol.55, Issue 13, pp.3032--3080, September, 2011.

[33] E. Alotaibi, and B. Mukherjee, “A survey on routing algorithms for wireless Ad-Hoc and mesh networks,” Computer Networks, Vol.56 Issue 2, pp.940--965, February, 2012.

[34] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, “Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing,” RFC3561, July, 2003

[35] D. Johnson, Y. Hu, and D. Maltz, “The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4,” RFC4728, February, 2007.

[36] I. Chakeres and C. Perkins, “Dynamic MANET on-demand (DYMO) routing,” Internet-Draft, draft-ietf-manet-dymo-07.txt, February. 2007.

[37] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized link state routing protocol (OLSR),” RFC3626, October, 2003.

[38] A. Iwata, C. Chiang, G. Pei, M. Gerla, and T. Chen, “Scalable routing strategies for ad hoc wireless networks,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol.17, Issue 8, pp.1369--1379, August, 1999.

[39] Y. Ko and N. H. Vaidya, “Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks,” In Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM’98), August, 1998.

[40] T. Watteyne, A. Molinaro, M. G. Richichi, and M. Dohler, “From MANET to IETF

ROLL Standardization: A Paradigm Shift in WSN Routing Protocols," IEEE Communications Survey & Tutorials, Vol. 13, No. 4, 2011.

[41] T. Winter, Ed., "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks," RFC6550, March, 2012.

[42] L. Doherty, W. Lindsay, J. Simon and K.Pister, "Channel-Specific Wireless Sensor Network Path Analysis," In Proceedings of 16th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN' 2007), August, 2007.

[43] M. Yu, A. Malvankar, W. Su, and S. Foo, "A link availability-based QoS aware routing protocol for mobile ad hoc sensor networks," Computer Communications, Vol.30, Issue 18, pp.3823--3831, December, 2007.

[44] Krishna Ramachandran, Irfan Sheriff, Elizabeth Belding, Kevin Almeroth, "Routing Stability in Static Wireless Mesh Networks," Passive and Active Measurement Conference (PAM'07), pp.73--83, April, 2007.

[45] M Bezahaf, L Iannone, MD De Amorim, and S Fdida, "Insights into the Routing Stability of a Multi-hop Wireless Testbed," Ad Hoc Networks, 2010.

[46] U. Ashraf, S. Abdellatif, and G. Juanole, "Route Stability in Wireless Mesh Access Networks," Embedded and Ubiquitous Computing, 2008, EUC '08, vol.2, pp.717--722, December, 2008.

[47] D. T. Delaney, R. Higgs, and G. M. P. O' Hare, "A Stable Routing Framework for Tree-Based Routing Structures in WSNs," IEEE Sensors Journal, vol.14, No. 10, pp.3533--3547, October, 2014.

[48] K. Ishibashi, and K. Yamaoka," A Study of Network Stability on Wireless Sensor Networks," 9th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies 2015, September, 2015.

[49] 石橋, 山岡, "ワイヤレスセンサネットワークのネットワーク安定性向上に向けた経路メンテナンス手法の提案," 信学技報, ASN2015-23, pp.15--20, July, 2015.

[50] スマートメーター制度検討会(第 14 回資料), March, 2014.

[51] ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会, "ユビキタスセンサーネットワークの実現に向けて," 2004.

[52] K. Ishibashi, and M. Yano, "A Proposal of Forwarding Method for Urgent Messages on a Ubiquitous Wireless Sensor Network," APSITT2005, November, 2005.

[53] 石橋, 矢野, "ユビキタス・ワイヤレス・センサ・ネットワーク上での緊急通報実現

に向けた Forwarding Method の検討," 信学技報, IN2005-156, pp.1--6, March, 2006.

[54] M. Marina, and S. Das, "On-Demand multiple distance vector routing in ad hoc networks," Proceedings of the International Conference on Network Protocols (ICNP), November, 2001.

[55] J. Guo, P. Orlik, J. Zhang, and K. Ishibashi, "Reliable Routing in Large Scale Wireless Sensor Networks," International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), pp.99--104, July, 2014.

[56] X. Yang, J. Guo, P. Orlik, K. Parsons, and K. Ishibashi, "Stability Metric Based Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks," IEEE International Conference on Communications (ICC), pp.3688--3693, June, 2014.

[57] X. Liu, J. Guo, G. Bhatti, P. Orlik, and K. Parsons, "Load Balanced Routing for Low Power and Lossy Networks," IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.2238--2243, April, 2013.

[58] J. Guo, C. Han, P. Orlik, J. Zhang, and K. Ishibashi, "Loop-Free Routing in Low-Power and Lossy Networks," International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), pp.59--pp.66, August. 2012.

[59] J. Ko, J. Jeong, and et al, "RPL Routing Pathology in a Network with a Mix of Nodes Operating in Storing and Non-Storing Modes," https://tools.ietf.org/html/draft-ko-roll-mix-network-pathology-04 (expired), IETF, 2014.

[60] J. Guo, P. Orlik, K. Parsons, K. Ishibashi, and D. Takita, "Resource Aware Routing Protocol in Heterogeneous Wireless Machine-to-Machine Networks," IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp.1--6, December, 2015.

[61] J. Guo, P. Orlik, and K. Ishibashi, "Resource Aware Hierarchical Routing in Heterogeneous Wireless IoT Networks," IEEE International Conference on Ubiquitous and Future Networks, July, 2016.

▪ 図目次

図 1.1　ユビキタスネットワークから M2M/IoT へ 7
図 2.1　M2M システムアーキテクチャ（文献[21]より抜粋） 15
図 2.2　M2M アーキテクチャモデル（文献[22]より抜粋） 15
図 2.3　M2M アプリケーションの分類 16
図 2.4　データ収集システム 20
図 2.5　データ収集と経路メンテナンス 20
図 3.1　アドホックネットワークの適用例 24
図 3.2　アドホックネットワークに関わる経路制御プロトコルの分類 25
図 3.3　DODAG の形成(上り方向の経路の学習) 29
図 3.4　下り方向の経路の確保 30
図 3.5　Trickle アルゴリズム 30
図 3.6　ワイヤレスセンサネットワークにおける経路公平性 32
図 3.7　経路不公平性の要因例 33
図 3.8　無線ノードの分布に偏りがある WSN における経路公平性 33
図 3.9　無線リンク変動の一例 34
図 3.10　時空間的な無線特性の変動 34
図 3.11　センサネットワークにおけるゲートウェイ近傍における経路の集中 35
図 3.12　センサネットワークにおけるパケット衝突 36
図 4.1　無線特性の変動による影響 40
図 4.2　ノード毎の無線リンク障害発生時のデータ到達率 41
図 4.3　パケット損とデータの再取得の関係 43
図 4.4　経路メンテナンス手法 44
図 4.5　局所経路再選択処理 47
図 4.6　コンピュータ・シミュレーションにおける PER 特性 48
図 4.7　無線リンク障害発生時のデータ到達率の比較 50
図 4.8　局所エリア抽出のための閾値による効果 52
図 4.9　局所エリア抽出フェーズにおける無線ノード抽出の閾値 K による効果 52
図 4.10　ゲートウェイからのホップ数による cDDR への影響 53
図 4.11　ノード数(ノード密度)による効果 54

図 4.12　エリア内にホール存在時の配置図 55
図 4.13　ノード配置による効果 55
図 5.1　複数のアプリケーションに活用されるワイヤレスセンサネットワークの概念 58
図 5.2　緊急性を要するパケットの送信開始時の経路探索遅延に関わる課題 60
図 5.3　経路途中でのパケット損による再送に伴う遅延に関わる課題 60
図 5.4　複数パスによる同時転送手法 63
図 5.5　特定ノードに向けた N 次冗長の経路探索機能 64
図 5.6　複数パスによるホップ・バイ・ホップ転送機能 66
図 5.7　複数パスによる同時転送手法の評価に対するシミュレーションモデル 67
図 5.8　50 ノード時のメッセージ損失率(Message Loss Rate) 69
図 5.9　50 ノード時の正規化トラヒック量(Normalized Traffic) 69
図 5.10　50 ノード時の正規化トラヒック量(Normalized Traffic) : Path 数による効果 70
図 5.11　50 ノード時の正規化トラヒック量(Normalized Traffic) : Path 数による効果 70
図 5.12　ノード数によるメッセージ損失率(Message Loss Rate)への影響 71
図 5.13　ノード数による正規化トラヒック量(Normalized Traffic)への影響 71
図 5.14　エリアサイズによるメッセージ損失率(Message Loss Rate)への影響 72
図 5.15　エリアサイズによる正規化トラヒック量(Normalized Traffic)への影響 ... 72
図 5.16　ネットワーク層におけるソフトウェアアーキテクチャ 74
図 5.17　メッセージフォーマット 74
図 5.18　50 ノードからなる実験用ワイヤレスセンサネットワーク 75
図 5.19　実験用ワイヤレスセンサネットワークの論理接続状況 76
図 5.20　緊急呼(Urgent messages)と Best-effort 型メッセージに対するメッセージ損失率(message loss rate)の比較 77
図 6.1　経路集約(Route Aggregation) 81
図 6.2　集約した経路に基づく経路探索手順(Route Discovery based on Aggregated Route) 82
図 6.3　経路集約のためのメッセージシーケンス 83
図 6.4　集約経路を用いた経路探索のためのメッセージシーケンス 83
図 6.5　経路集約手法の実装 84
図 6.6　経路集約手法を評価するための 50 ノードからなるネットワーク 85

図 6.7　経路集約手法の評価(経路テーブル) 86
図 6.8　経路集約手法の評価(経路探索手順に関わるトラヒック量の比較) 86

・ 表目次

表 2.1　スマートグリッドの課題と対応技術 11
表 2.2　M2M 応用事例の一例 16
表 4.1　cDDR の平均，分散等の比較(N=500) 51
表 4.2　cDDR の平均，分散等の比較(局所エリア抽出フェーズにおける無線ノード抽出の閾値 K) 53
表 4.3　cDDR の平均 ，分散等の比較(Hole 存在時) 55
表 5.1　シミュレーションパラメータ 68

・ 発表論文

本研究に含まれる発表論文

学会論文（査読あり）

1. 石橋, 山岡, “ワイヤレスセンサネットワークにおけるネットワーク安定性向上のための経路メンテナンス手法の提案,” 信学会論文誌 B, Vol.J100-B, No.5, pp.411--424, May, 2017.
2. K. Ishibashi, K. Takada, and M. Yano, “Proposal and Implementation Study of Forwarding Method for Urgent Messages on a Wireless Sensor Network,” IEICE Transactions on Communications, Vol. E90-B, No. 12, pp.3402--3409, December, 2007.

国際会議（査読あり）

1. J. Guo, P. Orlik, and K. Ishibashi, "Resource Aware Hierarchical Routing in Heterogeneous Wireless IoT Networks," IEEE International Conference on Ubiquitous and Future Networks, July, 2016.
2. J. Guo, P. Orlik, K. Parsons, K. Ishibashi, and D. Takita, "Resource Aware Routing Protocol in Heterogeneous Wireless Machine-to-Machine Networks," IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp.1--6, December, 2015.
3. K. Ishibashi, and K. Yamaoka,” A Study of Network Stability on Wireless Sensor Networks,” 9th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies 2015, September, 2015.
4. J. Guo, P. Orlik, J. Zhang, and K. Ishibashi, "Reliable Routing in Large Scale Wireless Sensor Networks," International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), pp.99--104, July, 2014.
5. X. Yang, J. Guo, P. Orlik, K. Parsons, and K. Ishibashi, "Stability Metric Based Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks," IEEE International Conference on Communications (ICC), pp.3688--3693, June, 2014.

6. J. Guo, C. Han, P. Orlik, J. Zhang, and K. Ishibashi, "Loop-Free Routing in Low-Power and Lossy Networks," International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), pp.59--pp.66, August. 2012.
7. K. Ishibashi, and M. Yano, “A Proposal of Forwarding Method for Urgent Messages on a Ubiquitous Wireless Sensor Network,” APSITT2005, November, 2005.

解説記事

1. 泉井, 石橋, "スマートグリッドにおけるセンサネットワーク技術の活用," 電気評論, 第 99 巻夏季増刊号, pp.43--48, June, 2014.
2. 石橋, 高田, 田村, 矢野, “アドホックルーティング技術,” 三菱電機技報, Vol.80, No.9, September, 2006.

招待講演・講演会

1. 石橋, “スマートハウスに関連する通信技術,” マイクログリッド交流会, November, 2015.
2. 石橋, "無線マルチホップネットワーク技術開発への取り組み,"第 30 回信学会 IN/NS 研究ワークショップ招待講演, pp.33--42, March, 2014.
3. 石橋, “スマートメータネットワークにおけるメッシュネットワーク技術,” 日本･中国･アジア連携の事業創出シンポジュウム, 新社会システム総合研究所(SSK), November 2010.
4. 石橋, “三菱電機におけるアドホックネットワークへの取組み,” アドホックネットワーク・コンソーシアム設立記念シンポジウム, May 2004.

国内学会発表

1. 石橋, 山岡, “ワイヤレスセンサネットワークのネットワーク安定性向上に向けた経路メンテナンス手法の提案,” 信学技報, ASN2015-23, pp.15--20, July, 2015.
2. 石橋, 曽我部, “ワイヤレスセンサネットワークにおけるネットワーク安定性に関する一検討,” 信学技報, IN2014-87, pp.33--38, November, 2014.
3. 石橋, 杣, 曽我部, “大規模ワイヤレスセンサネットワークにおけるデータ収集手法の一検討,” 信学技報, IN2013-35, pp.57--62, June, 2013.

4. 石橋, “大規模メッシュネットワーク実現に向けた検討,” 信学技報, CS2011-26, pp.91--96, July, 2011.
5. 石橋, 高田, 矢野, “大規模センサ・ネットワークの実現に向けた経路集約手法の実装評価,” 信学技報, USN2007-54, pp.101--106, October, 2007.
6. 石橋, 矢野, “ユビキタス・ワイヤレス・センサ・ネットワーク上での緊急通報実現に向けた Forwarding Method の検討,” 信学技報, IN2005-156, pp.1--6, March, 2006.
7. 石橋, 妹尾, 矢野, “Plug-and-Play によるインターネット接続を実現するアドホック・ネットワーク向け Routing Method の検討,” 信学技報, IN2004-171, pp.55-60, January, 2005.