

マルチホップワイヤレスネットワークにおける
アクセス方式に関する研究

Studies on Access Methods for Multi-hop Wireless Networks

2010年2月

早稲田大学大学院 国際情報通信研究科

国際情報通信学専攻

無線・衛星通信研究Ⅱ

那須 有希子

目次

第1章	序 論	1
1.1	研究背景.....	1
1.2	研究目的.....	2
1.3	マルチホップモバイル通信におけるアクセス方式の構築.....	5
1.4	本論文の構成.....	7
第2章	マルチホップワイヤレスネットワークの概要と課題	11
2.1	まえがき.....	11
2.2	マルチホップネットワーク技術.....	11
2.3	フラッディング問題.....	12
2.4	DSR 方式.....	15
2.5	AODV 方式.....	17
2.6	従来研究と課題.....	19
2.7	むすび.....	20
第3章	ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式	21
3.1	まえがき.....	21
3.2	マルチホップモバイル通信モデルの構築.....	21
3.2.1	PDC 方式.....	23
3.2.2	制御パケットの構成と制御チャネル割り当て.....	24
3.2.3	電波伝搬損失.....	26
3.2.4	受信信号レベルとビット誤り率.....	29
3.3	既存技術 AODV 適用型モデル.....	30
3.3.1	モデルの概要.....	30
3.3.2	シミュレーション諸元.....	32
3.3.3	シミュレーション結果及び課題の考察.....	34
3.4	基地局下り受信電力考慮モデル.....	40

目次

3.4.1	モデルの概要	41
3.4.2	シミュレーション結果	42
3.5	近隣状況把握による課題解決法	43
3.5.1	ユニキャストによる解決手段の提案	43
3.5.2	近隣状況把握パケットの構成とチャンネルの割り当て	43
3.5.3	最適依頼端末選択方法の考察	44
3.6	むすび	45
第4章	バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式.....	47
4.1	まえがき	47
4.2	バーチャルマップモデル	47
4.2.1	モデルの概要	47
4.2.2	バーチャルマップ作成	49
4.2.3	転送依頼端末決定方法	52
4.3	シミュレーション評価	55
4.3.1	シミュレーション諸元	55
4.3.2	近隣状況把握パケット送信回数検証	56
4.3.3	端末間受信電力による推奨 E_b / N_0 の算出	59
4.3.4	シミュレーション結果及び比較評価	60
4.4	むすび	65
第5章	圏外経過時間を考慮したユニキャストマルチホップモバイル通信方式.....	66
5.1	まえがき	66
5.2	圏外経過時間考慮モデル	66
5.2.1	モデルの概要	67
5.2.2	転送依頼端末の条件	68
5.3	シミュレーション評価	68
5.3.1	シミュレーション諸元	69
5.3.2	シミュレーション結果及び比較評価	70
5.4	むすび	73
第6章	メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用	75

6.1	まえがき	75
6.2	モデルの概要	76
6.2.1	モデルの定義	77
6.2.2	状態確率の定義.....	78
6.3	理論式の算出	80
6.3.1	物理的側面による関係式	80
6.3.2	状態遷移図による関係式	81
6.3.3	1hop における呼損率の理論解析	83
6.3.4	2hop のノード状態遷移図	83
6.4	シミュレーション評価.....	85
6.4.1	パラメータ定義及びシミュレーション諸元.....	85
6.4.2	理論式とシミュレーション結果及び考察.....	86
6.5	むすび	88
第7章	広域エリアでのマルチホップネットワークの適用.....	90
7.1	まえがき	90
7.2	HF 帯を用いた広域マルチホップネットワーク	92
7.2.1	モデルの概要	93
7.2.2	電離層反射波による伝搬	93
7.2.3	情報パケット転送アルゴリズム	97
7.2.4	送信タイミング選択モデルの提案.....	98
7.3	HF 帯アレーアンテナ	99
7.3.1	受信アンテナの利得と受信電力	99
7.3.2	アンテナの可逆性	100
7.3.3	アンテナの電界強度	100
7.4	電離層反射波の受信実験	102
7.4.1	実験用 HF 帯フェーズドアレーアンテナの構成.....	102
7.4.2	実験環境.....	102
7.4.3	実測による性能評価	105
7.5	シミュレーション評価.....	109
7.5.1	シミュレーション諸元.....	109
7.5.2	シミュレーション結果及び考察	110

目次

7.6	むすび	115
第8章	結 論	117
8.1	本研究で得られた成果	117
8.2	今後の課題	119
謝 辞	120	
参考文献	121	
研究業績	125	

図目次

図 1-1: 電波の利用分野.....	1
図 1-2: 無線通信形態の分類とグローバルネットワーク構築.....	3
図 1-3: 各通信スケールにおけるマルチホップ通信.....	5
図 1-4: マルチホップネットワークを構築した例.....	6
図 1-5: ブロードキャストとユニキャストの比較.....	7
図 1-6: 論文の概要.....	10
図 2-1: 無線 LAN 接続.....	12
図 2-2: モバイルアドホックネットワーク.....	12
図 2-3: ルーティングプロトコル.....	13
図 2-4: フラッドイングによるルート構築.....	15
図 2-5: 宛先端末 B までのルート検索 (DSR).....	16
図 2-6: 発呼端末 A までのルート検索 (DSR).....	16
図 2-7: 宛先端末 B までのルート検索 (AODV).....	18
図 2-8: 発呼端末 A までのルート構築 (AODV).....	18
図 3-1: 基地局とのネットワーク構築 (1hop).....	22
図 3-2: 基地局とのネットワーク構築 (2hop).....	22
図 3-3: フルレート方式.....	23
図 3-4: マルチアクセス方式.....	24
図 3-5: RREQ パケットの標準構成.....	25
図 3-6: 呼発生端末による通信要求パケットの送信.....	31
図 3-7: 通信要求パケット受信端末の動作と転送される通信要求パケットの構成... 31	31
図 3-8: 2hop で通信開始.....	32
図 3-9: 送信回数別パケット送信成功率.....	35
図 3-10: 送信回数別パケット衝突率.....	35
図 3-11: 送信回数別ルート構築率.....	36
図 3-12: hop 数別通信接続率.....	37
図 3-13: 1hop 時の距離別通信接続率.....	38
図 3-14: 2hop 時の距離別通信接続率.....	38
図 3-15: 3hop 時の距離別通信接続率.....	39
図 3-16: 3hop 時の端末数別パケット衝突率.....	39
図 3-17: 圏内端末選択.....	41

図目次

図 3-18: 基地局受信電力レベル推移リンク確立成功率	42
図 3-19: 近隣状況把握パケットと ACK の送信スロット	44
図 3-20: 最適な依頼端末の考察	45
図 4-1: グルーピングまでのフローチャート	48
図 4-2: 近隣状況把握パケットと ACK 受信時の動作	49
図 4-3: 端末 E, H のルーチングテーブル	50
図 4-4: バーチャルマップ	51
図 4-5: グループ数と距離の関係	52
図 4-6: 4 グループになるまでのフローチャート	53
図 4-7: バーチャルマップを用いた転送依頼端末決定方法	54
図 4-8: 送信制限回数別制御パケット送信成功率	58
図 4-9: 送信制限回数別制御パケット衝突率	58
図 4-10: 推奨 E_b / N_0 値の算出	60
図 4-11: 転送依頼端末数別パケット送信成功率とパケット衝突率	62
図 4-12: hop 数別パケット送信成功率とパケット衝突率	62
図 4-13: ルート構築率とパケット衝突率の比較(1/2)	63
図 4-14: 制御パケットの総数の比較(2/2)	63
図 5-1: 圏外経過時間とカバーエリアの関係	67
図 5-2: 転送依頼端末数別ルート構築率	71
図 5-3: ルート構築率の比較(1/3)	71
図 5-4: パケット衝突率とルート発見平均スロット数の比較(2/3)	72
図 5-5: ルート構築率とルート発見平均スロット数の比較(3/3)	72
図 6-1: 家庭用固定無線端末を用いたマルチホップ通信モデル	76
図 6-2: ノードの状況と変数の関係	78
図 6-3: ノードの状況と状態の関係	79
図 6-4: 1hop のノード状態遷移図	81
図 6-5: 2hop のノード状態遷移図	84
図 6-6: 理論式とシミュレーション結果の比較	86
図 6-7: 呼発生率別呼損率	87
図 6-8: 呼発生率別強制切断率	87
図 7-1: 広域 HF 帯マルチホップ通信モデル	91
図 7-2: HF 帯マルチホップ通信モデル概略図	92
図 7-3: マルチホップネットワーク適用例	93
図 7-4: 電波伝搬	94
図 7-5: 電離層の状況	95
図 7-6: 電離層反射	96

図 7-7: 送信仰角変化に伴う跳躍距離の変動.....	97
図 7-8: 送信タイミング選択モデルの概要.....	99
図 7-9: フェーズドアレーアンテナの構成.....	101
図 7-10: 実験用アンテナ.....	103
図 7-11: 臨界周波数の日周変化.....	104
図 7-12: 7MHz 電離層反射波の伝搬特性比較.....	107
図 7-13: 14MHz 電離層反射波の伝搬特性比較.....	107
図 7-14: ネットワークスケールとカバー率の関係 (アンテナ 1 素子)	111
図 7-15: ネットワークスケールとカバー率の関係 (アレーアンテナ同相 2 素子)	111
図 7-16: ネットワークスケールとカバー率の関係 (アレーアンテナ位相差有 2 素子)	112
図 7-17: hop 数別カバー率の比較	112
図 7-18: パケット衝突率の比較.....	113
図 7-19: hop 数とスロット成功率の関係	113
図 7-20: 転送制御の有無によるカバー率の比較	114

表目次

表 3-1: シミュレーションパラメータ	33
表 4-1: シミュレーションパラメータ	56
表 5-1: シミュレーションパラメータ	69
表 6-1: 変数の定義	77
表 6-2: ノードの状態	79
表 6-3: ノードの状態確率	79
表 6-4: 確率変数	80
表 6-5: シミュレーションパラメータ	85
表 7-1: 半波長ダイポールアンテナの仕様	103
表 7-2: 計測実験における各種パラメータ	103
表 7-3: 7MHz の実験結果	104
表 7-4: 14MHz の実験結果	105
表 7-5: 位相変調度数あたりの受信電力値 (7MHz)	106
表 7-6: 位相変調度数あたりの受信電力値 (14MHz)	106
表 7-7: 各出力送信時の電離層反射波の到達距離 (7MHz)	108
表 7-8: 各出力送信時の電離層反射波の到達距離 (14MHz)	108
表 7-9: 実験結果評価用シミュレーションパラメータ	109
表 7-10: 比較用シミュレーションパラメータ	110

第1章

序論

1.1 研究背景

無線通信技術は、ビジネスや家庭生活などの身近な場面で多く用いられており、その利用分野も多岐にわたる。例えば、通信や放送の分野に視点を向ければ図 1-1 に示すように、携帯電話、デジタル放送、衛星放送、RF-ID、無線 LAN などのシステムに使用されている。これらのシステムを実現するには、それぞれの使用目的や伝送距離や伝送速度などに応じて、適切な通信方法を用いる必要がある。

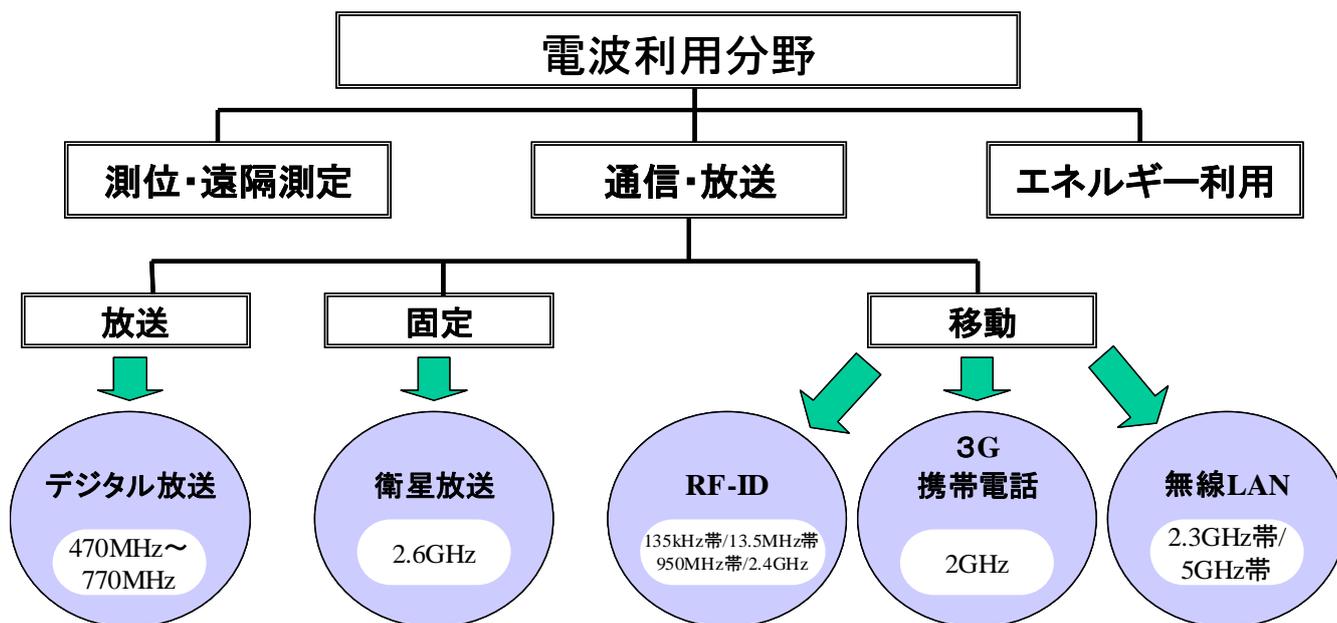


図 1-1: 電波の利用分野

またコンピュータの小型化や高性能化が進み、ノート型の PC や PDA などといったポータブルコンピュータが幅広く利用されるようになった。またネットワーク技術の発達や www 網をはじめとするネットワークアプリケーションの普及により、ネットワークに接続されるコンピュータの比率が急速に高まっている。このような背景から、コンピュータ

第1章 序論

をネットワークに接続し移動して利用するモバイルコンピューティングへの要求が増している。そのため IEEE802.11 や HIPERLAN などの無線 LAN プロトコル技術が研究、開発されつつある。また携帯電話や PHS などの急速な普及に伴い、場所にとらわれずいつでもどこでも通信サービスを行えるユビキタス社会の実現が求められている。同時に、ブロードバンド技術の発展により、通信サービスをめぐる業界の構造全体が大きく変化している。よって、ユーザーの要求を満たす新たなサービスを提供するために次世代ネットワーク NGN (Next Generation Network) の構築が本格化している。なかでも Bluetooth や HomeRF に代表される近距離で高速な無線通信技術が、実用段階にきている[1]。

更に視野を広げると、総務省では重要通信を確保するために NTT グループを中心とする体制のもと、国や有線・無線電気通信事業者及び産業界が連携して効果的な非常時通信の仕組みを検討している[2]。具体的には無線通信技術を効果的に取り込んだ「防災用無線通信システム」として内閣府に設置される非常災害対策本部を中心に開発されつつある。これにより機関相互間また都道府県や市町村の地域住民に対する情報収集や情報伝達が行えるようになる。

このように無線通信システムをめまぐるしい技術革新により、無線通信へのニーズがよりいっそう高まっている。しかし、現在の無線通信はアクセスポイントといったインフラに依存しているため、通信エリアが制限されてしまう。またインフラが機能しなくなると、通信不可能となる状況が生じてしまう。よってインフラに依存しない新たな無線通信技術の開発を行う必要がある。そこで本論文ではマルチホップワイヤレスネットワーク技術に着目し、無線通信への適用を検討する。

マルチホップネットワークは端末にルーターの機能を付加させて各端末を中継することでアクセスポイントなどといったインフラを介さずに即席にネットワークを構築する技術である。端末さえあればネットワークを構築できることからワイヤレスアドホックネットワークとも呼ばれ、さまざまな分野において研究がなされている[3][4]。マルチホップネットワークは歴史が深く、大規模災害時の通信確保やユビキタスネットワークの実現手段としても検討されている[5][6][7]。またアドホックネットワークはインターネット技術のひとつの分野として IETF (Internet Engineering Task Force) で標準化が進展している。

このように無線通信技術の更なる発展のなか、ネットワークの効率的な融合が期待されている。多岐にわたる無線通信システムにマルチホップネットワークを効果的に用いることは、多様で大規模な無線通信を可能とするグローバルネットワーク構築の鍵となる。

1.2 研究目的

多種多様化する無線通信技術に対応するべく、新しい無線通信技術として MANET (Mobile Ad hoc NETwork) の Working Group などでマルチホップネットワークが提案されている[8]。現在、主に用いられている無線通信は、基地局などのインフラ依存のため、

通信可能エリアが制約されてしまう。このような課題の解決を図るために、マルチホップネットワークをさまざまな場面で活用する研究が行われている[9]-[11]。マルチホップネットワークを活用するためには、通信分野や通信環境に配慮してネットワークの構築を検討する必要がある。また端末が自律分散的にルーチングを行うことで、制御パケットの増加、パケット衝突、中継端末の負荷増などといったマルチホップ特有の問題が生じてしまう[11][13][14]。よって、マルチホップネットワークの利点を生かしさまざまな通信場面で有効的に使用するには、ルーチングの際のアクセス方式を適宜変化させ改良する必要がある。本論文では、既存の無線通信へマルチホップネットワークを適用し、利便性の高い新たな通信モデルの確立を図る。

無線通信は、使用する周波数によりその性質が異なり通信のスケールもさまざまとなる。また、アンテナの長さも周波数により変化するためモビリティも異なる。本論文では、図 1-2 の色枠内にある無線通信形態において、マルチホップを適用する総括的なネットワークの構築を目指す。特にモバイル通信へ適用する通信モデルの提案を主軸にして考察を進める。マルチホップ適用が無線通信へもたらす効果を明らかとし、ルーチング時のアクセス方式の最適化を図る。

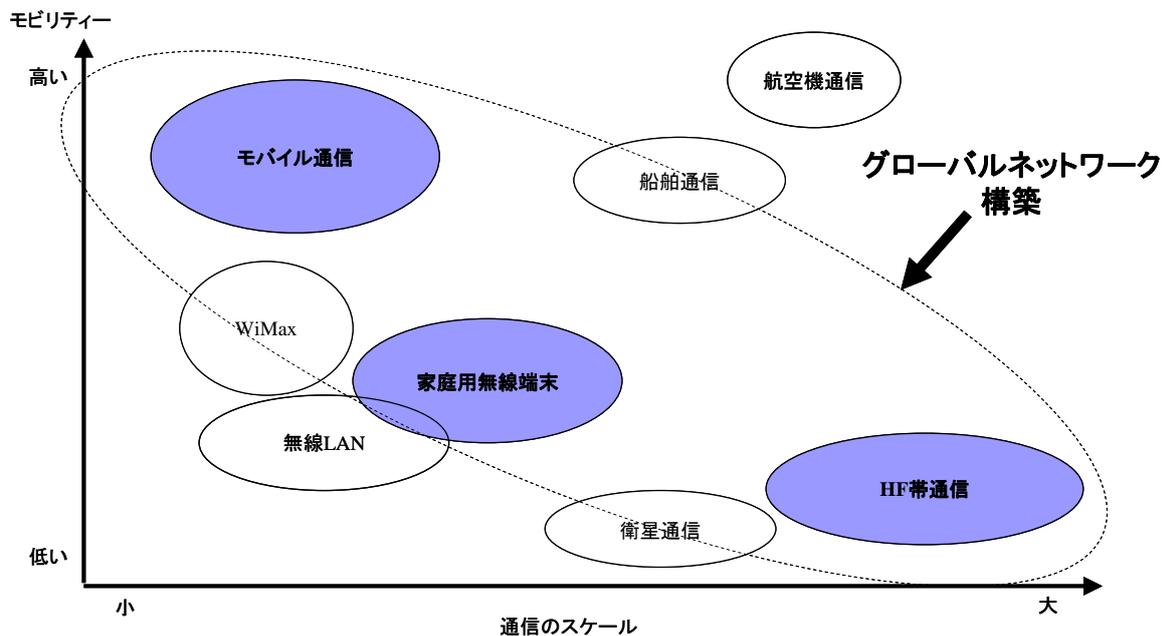


図 1-2: 無線通信形態の分類とグローバルネットワーク構築

まず、高度化するモバイル通信ネットワークをより快適なものとするため、モバイル通信にマルチホップネットワークを適用する「マルチホップモバイル通信モデル」を提案する。近年、携帯端末などのモバイル端末の需要が急速に増加しており、通信サービスも多種多様化している。また場所にとらわれずにネットワークを確立したいという要求が増し

第1章 序論

ており、無線通信による通信容量の増大、通信品質の改善などの課題があげられている。しかし現在のモバイル通信は、基地局などのインフラに依存しているため、ビルの上階や地下街など電波の届きにくいエリアでは通信不可能となってしまう。基地局でカバーされたエリアにある端末でも、建物の影や遮蔽物の近くといった場所では通信不可能となる。このような場所はデッドスポットと呼ばれ、補完のために多くの研究がなされている[15][16]。本モデルは、モバイル通信において圏内端末は通常通りにセルラ方式を利用し通話する前提のもと、圏外端末はマルチホップネットワークを利用して、近くの端末を中継端末として圏内端末-圏外端末間のネットワークをアドホックに構築して通信可能とするモデルである。マルチホップネットワークをモバイル通信へ適用する上での課題として、端末が逐次移動するモバイル環境でのルーチング方式の確立がある。本論文ではルーチング方式として移動に適した AODV を基底とした「AODV 適用型モデル」を提案する。ただし、AODV はフラッディングを用いているので制御パケットの衝突、トラヒック増加などの問題が生じる[17][18]。このような問題を回避し、通信品質を考慮した柔軟なマルチホップモバイル通信モデルの構築を目指すため、ルーチングを行う際に最適なアクセス方式について検討する。

AODV 方式ではルート構築のために送信される制御パケットをブロードキャストする技術が用いられている。本論文ではパケット削減を目的とし、ユニキャストで制御パケットを送信するモデルを「ユニキャスト方式」として提案する。ユニキャスト送信する宛先端末を選択する方法について 2 つの観点からモデルの改良を進める。まず、通話時間が長くなることを目的としたモデルとして「バーチャルマップモデル」を提案する。次に、ネットワークを即座に発見することを目的としたモデルとして「圏外経過時間考慮モデル」を提案する。両モデルを AODV 適用型モデルと比較することで、それぞれの有効性の評価を行う。

次に、他の無線通信へのマルチホップ適用について検討する。

最初に、各家庭にある無線通信用の固定端末にマルチホップネットワークを適用する「家庭用固定無線端末によるマルチホップ通信モデル」を提案する。これはメトロポリタンエリア内通信にマルチホップネットワークを適用し、エリア外への通信においては通常通り電話回線など有線網により交換局を介して通信するモデルである。メトロポリタンエリア内の通話は交換局を介さないため無料通話サービスが実現でき、交換局が機能しなくてもインフラフリーに通話ができるため非常時通信としても役立つ。このモデルを理論解析と計算機シミュレーションにより性能評価し、マルチホップの効果的な適用法を検討する。

次に、大規模な災害の影響により既存の通信インフラが使用不可能になった際に、簡易で即座にネットワーク構築可能となる通信システムとして「HF 帯を用いた広域マルチホップ通信モデル」を提案する。本提案モデルは緊急時に被害エリアで即時的にアンテナ局を設置し、広域通信を可能とするため HF 帯(短波帯)を用いてネットワークを構築する。また、想定される被害エリアにあるすべての局が、災害情報パケットを送信または受信す

ることを目的とする。マルチホップネットワークを適用する際のアクセス方式を提案し、電離層反射波特性の実験結果をもとに、シミュレーションにてモデルの性能評価を行う。

図 1-3 は、本論文で提案するモデルについて通信スケールごとの位置付けを表している。このように、既存技術を有効利用して適宜マルチホップネットワークを用いる新たな無線通信モデルにより無線通信技術の更なる向上が期待できる。加えて、各モデルの通信スケールを、Small Area, Metropolitan Area, Large Area として各エリアをマルチホップネットワークで融合させることで図 1-2 の点円が示すような、あらゆる通信スケールを網羅したグローバルネットワークの構築が可能となる。

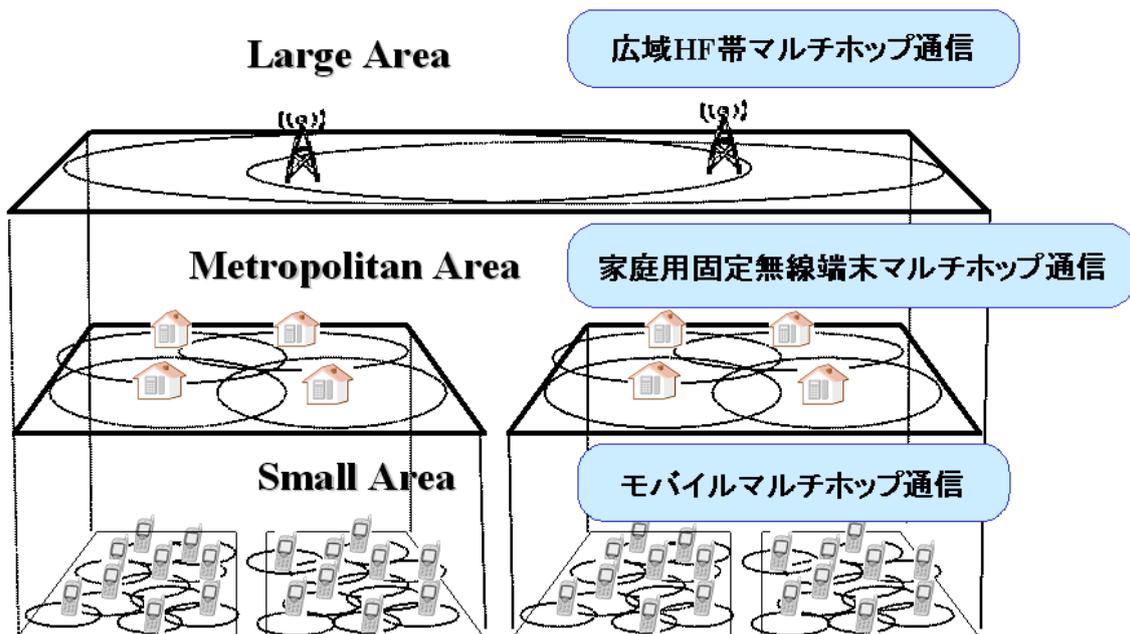


図 1-3: 各通信スケールにおけるマルチホップ通信

1.3 マルチホップモバイル通信におけるアクセス方式の構築

本論文の主提案であるモバイルマルチホップ通信モデルにおける、ルーチングのアクセス方式について説明する。図 1-4 で円に影がかかっている部分は基地局のカバーエリアを、それ以外は圏外を示している。通常は、圏外端末は通話を行うことはできないが、圏外端末が圏内端末との間に図 1-4 の点線で示すようにネットワークを確立できれば、途中の端末を中継端末として利用することで基地局との通信が可能となる。このようにマルチホップネットワークを端末間の通信に適用することで、基地局のカバーエリアの拡大を図る。ここで、圏外端末は自律分散的にルーチングを行い圏内端末までのネットワークを構築しなければならない。つまり圏外端末は図 1-4 の点線矢印で示すように制御パケットの送信

第1章 序論

することでネットワークを構築する。このため、制御パケットのアクセス方式を検討する必要がある。

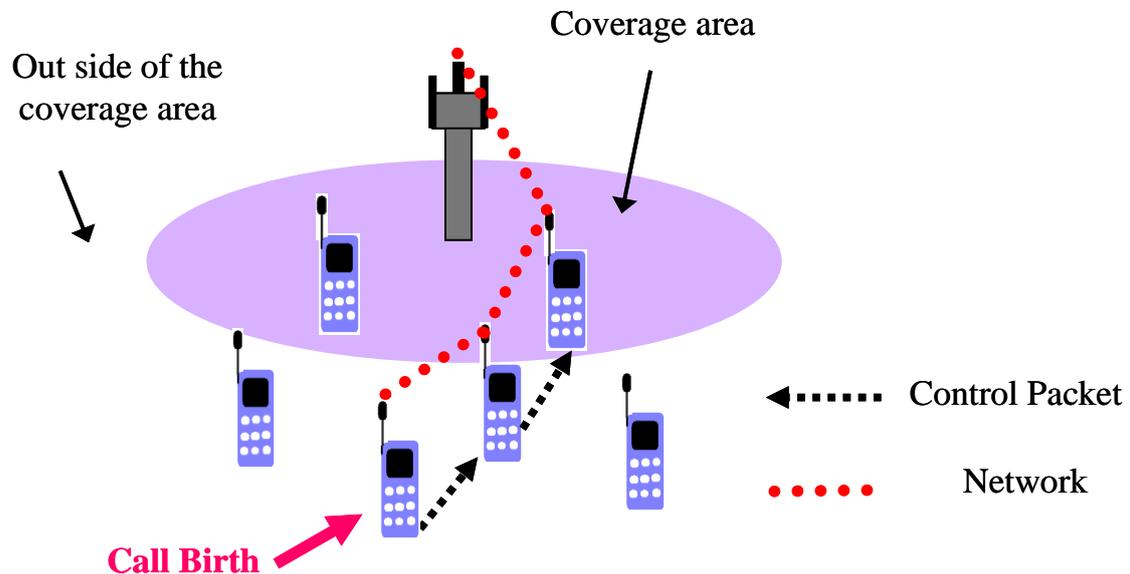


図 1-4: マルチホップネットワークを構築した例

マルチホップネットワークのルーチングはさまざまな方式が提案されている。その基本は、フラディングを基盤として制御パケットをブロードキャストにてバケツリレー方式で送信し続ける方法となる。そのため、制御パケットの衝突や大量流出などの問題が生じてしまう。例えば図 1-5 の左図の端末 A が圈内端末を検索するために制御パケットをブロードキャストで送信すると、端末 A の近隣端末 B はその近隣端末へ、端末 B の近隣端末 C はその近隣端末へといった順に制御パケットが送信される。これにより、パケットのオーバーフローが生じてしまい、他の端末への負担が増え、パケット衝突も頻繁に生じてしまう。しかし、図 1-5 の右図のように、端末 A がある端末のみに制御パケットをユニキャストで送信し、その近隣端末もユニキャストでの制御パケット送信を繰り返すことで、パケット衝突が頻繁に生じる問題を解決することができる。

そこで本論文では、制御パケットの送信方式としてブロードキャストを用いてネットワークを構築するモデルと、ユニキャストを用いてネットワークを構築するモデルを提案する。そしてユニキャストを用いたモデルでは、ユニキャスト先となる制御パケットの送信先端末の選択方法について考察し、従来のアクセス方式と比較しつつモデルの改善を図る。

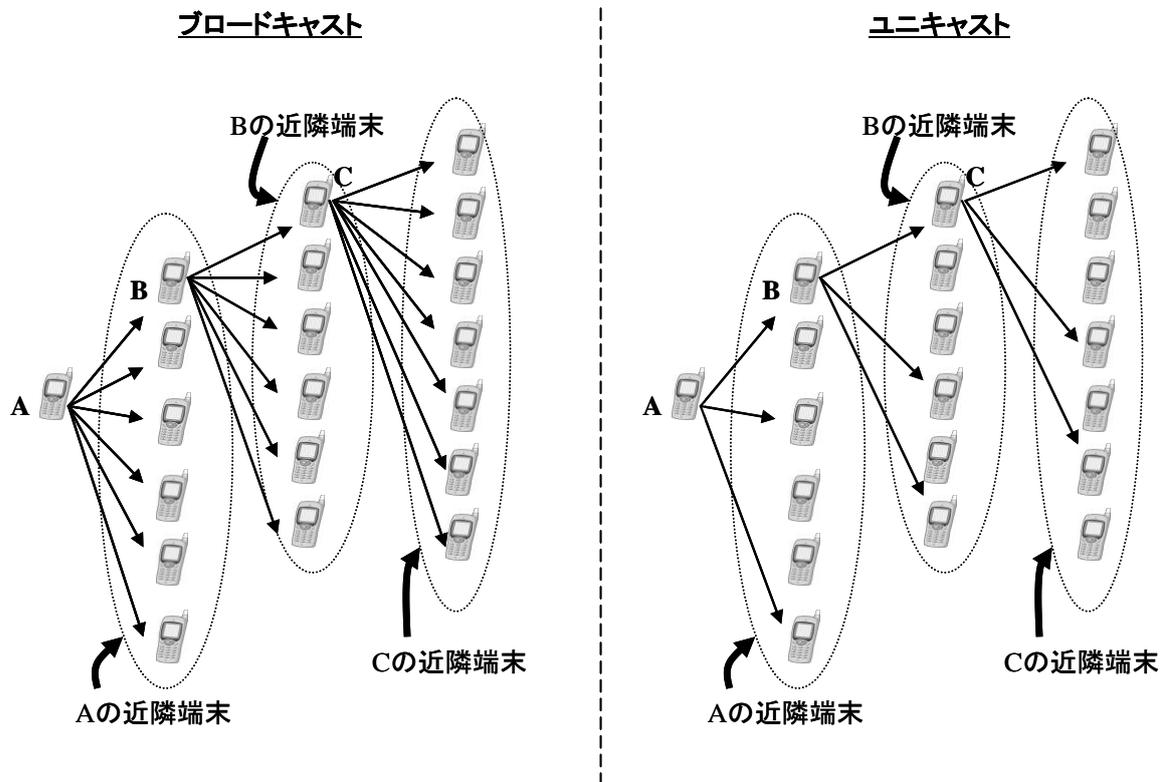


図 1-5: ブロードキャストとユニキャストの比較

1.4 本論文の構成

本論文は、あらゆる無線通信スケールにおいてマルチホップネットワークを用いた新たな通信モデルの確立と、各通信モデルの特性を評価した筆者の一連の研究結果をまとめたものである。各章の概要を以下に述べる。

第1章 序論

第1章は序論であり、研究の背景と目的、及び論文の構成について述べる。マルチホップネットワークを適用する無線通信分野としてモバイル通信について焦点をおき、ルーティングにおけるアクセス方式の課題を示し、解決方法として「ユニキャスト方式」を提案する。また、家庭用無線端末通信、HF帯通信へマルチホップネットワークを用いる提案モデルの意図を述べる。

第2章 マルチホップワイヤレスネットワークの概要と課題

第2章では新しい通信技術としてMANETで提案されているマルチホップワイヤレスネ

第1章 序論

ネットワークの具体的な概要を述べる。フラッドイングをベースとした既存のルーチング方式である DSR, AODV のアルゴリズムを詳しく説明する。ルーチング時のフラッドイングによる制御パケットの衝突や大量流出, 中継端末の負担増加といった, マルチホップ特有の課題を示し, 課題解決の必要性を示唆する。

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

第3章はモバイル通信へマルチホップネットワークを導入した「マルチホップモバイル通信モデル」のアクセス方式について検討した結果を述べる。マルチホップネットワークのルーチング方式として既存の AODV を用いた「AODV 適用型モデル」を提案し, 計算機シミュレーションにより性能評価することで, その問題点をあげる。また圈内端末が中継端末として複数端末存在する場合の中継端末決定方法として「基地局下り受信電力を考慮した圈内端末決定モデル」を提案し有効性を示す。最終的に, AODV 適用型モデルの問題解決策として, 制御パケットをユニキャストする「ユニキャスト方式」を提案し, 適切なユニキャスト先端末の選択方法について考察する。

第4章 バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式

第4章ではマルチホップモバイル通信モデルのアクセス方式に, ユニキャスト方式を適用した「バーチャルマップモデル」を提案する。このモデルは 360° あらゆる方向へ制御パケットを送信することを目的としており, 近隣端末や近隣端末同士の位置情報をもとに転送依頼端末を決定し制御パケットをユニキャスト送信する。またマルチホップネットワークを構築した後, 通話時間が長くなるといった QoS のパフォーマンスにおいても改善されるよう, 更なるモデルの最適化も検討する。バーチャルマップモデルを AODV 適用型モデルと比較するため計算機シミュレーションにより性能評価し, バーチャルマップモデルに適したパラメータの推奨値算出も図る。

第5章 圏外経過時間を考慮したユニキャストマルチホップモバイル通信方式

第5章では, ユニキャスト先の端末を決定する依頼端末選択方法として, 即座にネットワークを構築することを目的とした「圏外経過時間考慮モデル」を提案する。このモデルによって, 圈内端末を早期に発見できると考えられ, ネットワークの早期構築が可能となる。圏外経過時間考慮モデルを計算機シミュレーションにより性能評価し, AODV 適用型モデルとの性能を多角的に比較検討する。

第6章 メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

第6章では各家庭にある家庭用無線端末にマルチホップネットワークを適用する「家庭用固定無線端末を用いたマルチホップ通信モデル」を提案する。本提案モデルの適用範囲としてメトロポリタンエリアを想定し, メトロポリタンエリア内の通信にはマルチホップ

ネットワークを用い、それ以外へは通常通り既存の交換局を用いた通信を行う。提案モデルの呼損率について理論解析により理論式を導き、計算機シミュレーションとあわせた評価を行うことで、理論式とシミュレーションの整合性を示す。また、提案モデルをさまざまな視点からシミュレーションにより評価することで、強制切断率と呼損率との関係を明らかとする。同時に、家庭用無線端末の通信可能距離の違いが強制切断率に与える影響についても評価する。

第7章 広域エリアでのマルチホップネットワークの適用

第7章では、災害時においてHF帯を利用する通信へマルチホップネットワークを導入する「広域HF帯マルチホップ通信モデル」を提案する。短波帯の性質である電離層反射波を効果的に用いることで、広域通信を可能とし通信の拡張性を高める。ただし、電離層反射波の通信特性は一定とは限らず、スキップゾーンが生じるといった課題があるため、これらの問題解決法を検討する。まず電波の性質や電離層反射について述べ、電離層反射波の問題点であるスキップゾーンについて具体的に説明する。このスキップゾーンを縮小させるために、まずはフェーズドアレーアンテナを用いるモデルを検討する。フェーズドアレーアンテナは電波の送受信時に高利得を得ることができ、電離層反射波の通信距離を変動させることができる。フェーズドアレーアンテナの仰角制御を行えばスキップゾーンの縮小は可能だが、完全になくすことは困難である。そこでマルチホップネットワークを導入することでスキップゾーンの補完を図る。本章では、フェーズドアレーアンテナの仰角を変化させた場合における電離層反射波の伝搬特性を実験により測定し、実験結果をもとに提案モデルを計算機シミュレーションにより評価する。更にマルチホップ特有の問題であるフラグディングによるパケット衝突増加を回避するために、パケット受信電力をもとに転送タイミングを制御する「送信タイミング選択モデル」を導入し、シミュレーションにより性能評価することで問題の改善を示す。

第8章 結論

第8章では結論として本論文の研究成果と今後の課題を述べる。

図 1-6 に本論文の概要を示す。

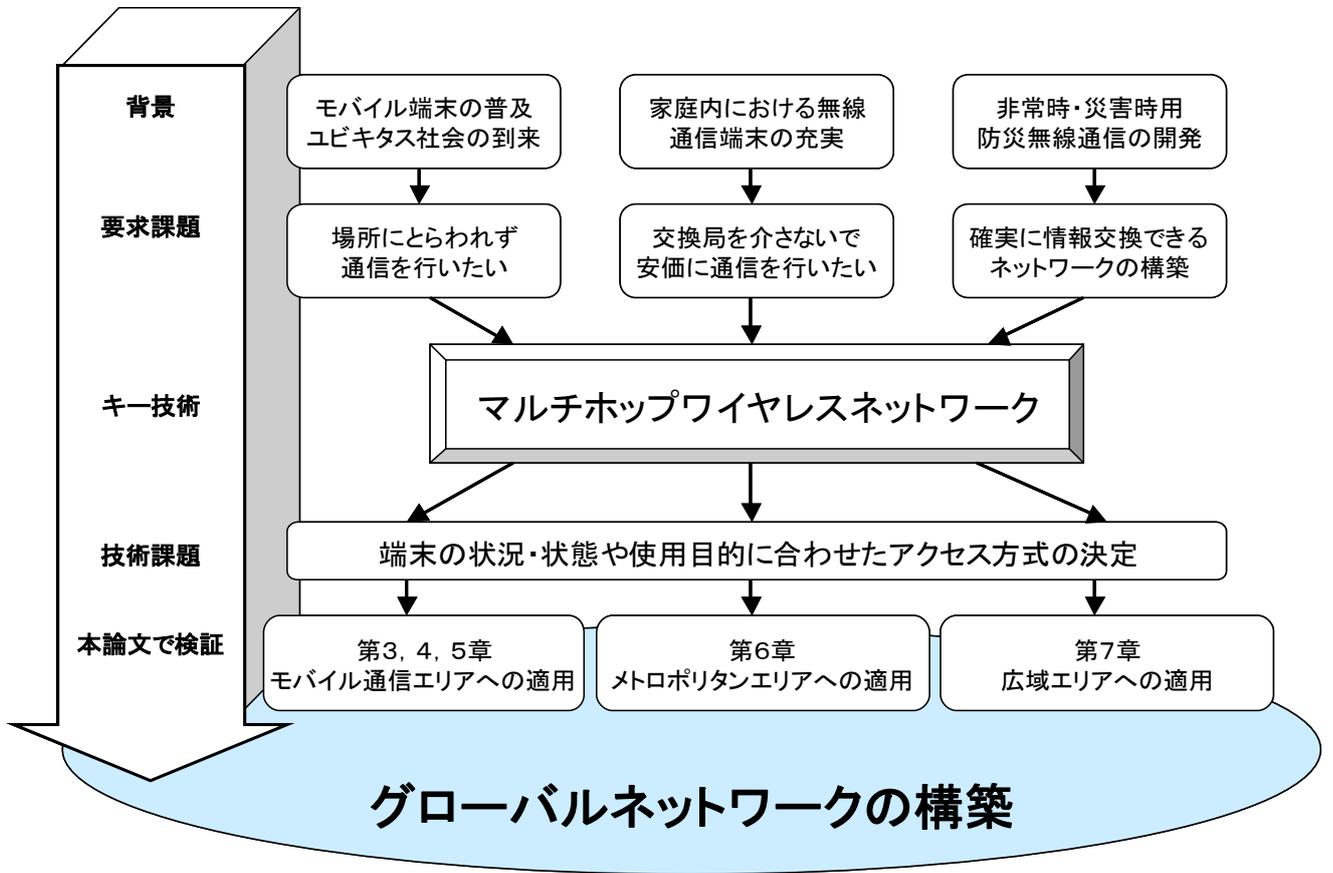


図 1-6: 論文の概要

第2章

マルチホップワイヤレスネットワークの概要と課題

2.1 まえがき

近年、無線通信技術の高速な発達や、携帯電話やモバイル端末の急速な普及に伴い、さまざまな移動通信サービスが開発されつつある。ユビキタス社会の到来に伴い、場所にとらわれずいつでもどこでもサービスを受けたいという要求も増えており、通信容量の増大、通信品質の改善を求める声も増している。このように多様化・高度化する移動通信サービスに対する無線通信技術について多くの研究が進められているなか、新しい通信技術として IETF の MANET working group で提案されているマルチホップワイヤレスネットワークが注目を集めている[8].

マルチホップネットワークは、端末間を他の端末が中継を行うことでネットワークを構築する技術であり、即座にネットワークを確立することから、無線アドホックネットワークとも呼ばれる。アドホックネットワークは基地局や有線網に依存せず、端末のみで構成される自律分散型のネットワークである。マルチホップネットワークを効率よく用いるためのルーティングやマルチキャスト、ブロードキャストに関する技術的な課題などは山積しているが、今後の情報通信基盤に必要な不可欠な技術であるため、発展が期待されている[30][31].

2.2 マルチホップネットワーク技術

現在の標準的な無線 LAN やモバイル通信は、アクセスポイントと呼ばれる有線ネットワークと無線ネットワークをシームレスに接続するネットワーク接続デバイスや、基地局といったインフラを中心に図 2-1 のようにネットワークを構築している。そのため、ひとつの無線インフラにより限定された範囲内に多くの通信要求が集中したり、または、災害などにより基地局が障害を受けたりすると、その接続された範囲内のネットワークが機能しなくなる問題が生じてしまう。

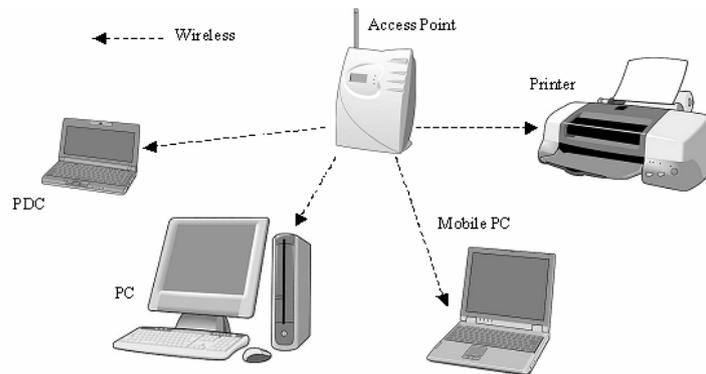


図 2-1: 無線 LAN 接続

そこでマルチホップネットワークを利用し、複数の互いに対等で自律分散的に振舞うことのできる端末を持ち寄り、各端末が無線通信機を備えたルーターとなることで、アクセスポイントや基地局、有線網といったインフラを必要とせずにワイヤレスネットワークを一時的に構築できる。いわゆるインフラフリーのネットワークを構築可能となる。図 2-2 のように直接情報通信できない離れた場所にある端末同士が通信を行う場合には、途中に存在する通信可能な端末を中継するマルチホップ通信によりワイヤレスネットワークが構築可能となる。図 2-2 において、ネットワークを構築する端末はノードとも呼ばれ、特にノードが移動する場合をモバイルアドホックネットワークという。

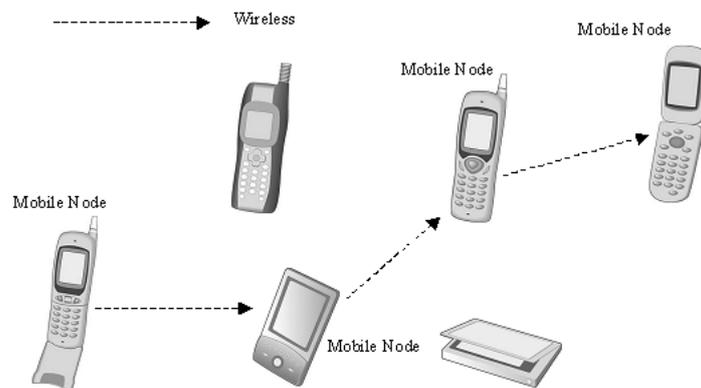


図 2-2: モバイルアドホックネットワーク

2.3 フラッシング問題

モバイル通信へのマルチホップネットワーク適用に関して現在多くの提案がなされており、なかでもルーティングプロトコルの研究が盛んである[23][33][34]。図 2-3 は提案され

ている主なルーチングプロトコルの種類をまとめたものである[1][35].

ルーチングプロトコルはテーブル駆動方式とオンデマンド方式の2つに大別される[36]. 以下に, それぞれの特徴を述べる.

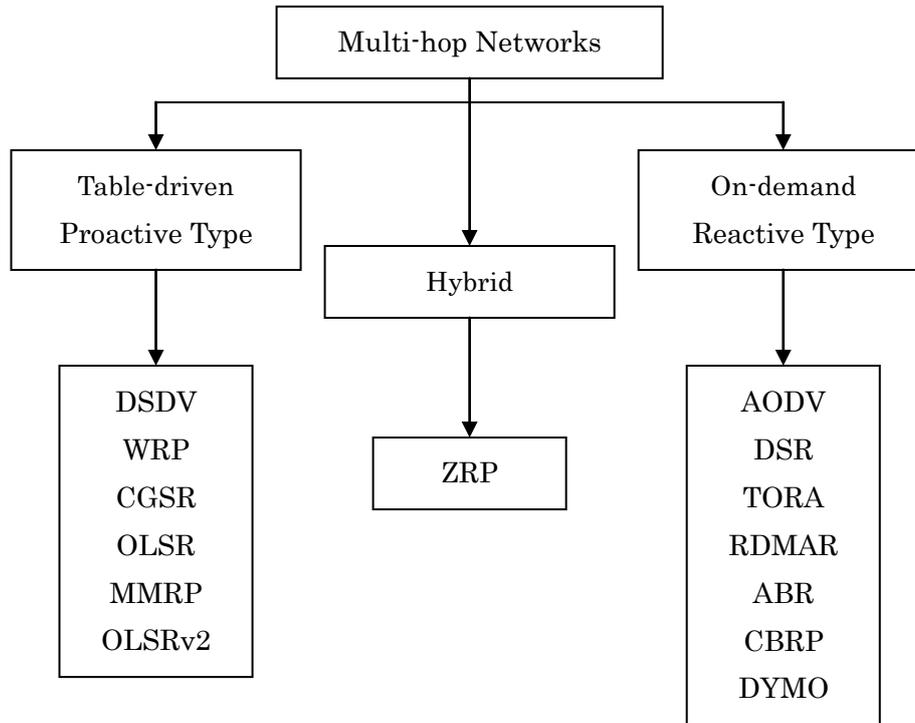


図 2-3: ルーチングプロトコル

◆ テーブル駆動方式 (Proactive Type)

各端末は通信要求先の宛先アドレスと, その端末とネットワークを構築するための次ホップにある端末アドレスを対応させたルーチングテーブルを保持している. このルーチングテーブルは **Hallow** パケットと呼ばれる制御パケットを定期的を送受信することで更新される. 端末は通信要求としての制御パケットを受信すると, 保管しているルーチングテーブルを参照して, その宛先アドレスとネットワークを構築するための次ホップにある端末へ制御パケットを転送する. 受信した端末もこれを繰り返すことで, 宛先端末とのネットワークを構築する.

この方式は各端末が定期的な制御パケットを送受信するために, 常に一定の制御オーバーヘッドが発生し, トポロジーが随時変化する場面では適切なルート発見が遅くなる. ただし, オンデマンド方式と比べ即座にネットワークを構築できる.

第2章 マルチホップワイヤレスネットワークの概要と課題

◆ オンデマンド方式 (Reactive Type)

呼を発生した端末は、その都度、宛先端末へのルート検索を行う方式である。発呼端末は通信要求としての制御パケットをフラッディング方式により転送する。無事、宛先端末が制御パケットを受信すれば、発呼端末にむけて返信することでネットワークを構築する。また、端末の移動により構築されたルートが使用できなくなった場合は、切断された局所的なルート間で制御パケットのフラッディングを行うことでルートの再構築を図る。

この方式は、通信端末数が増加したり、通信要求が増えたりすると、制御オーバーヘッドが大きくなりルート検索時間による遅延が大きくなる。ただし、通信を行わない場合には制御オーバーヘッドを低くでき、トポロジーの変化に対応しやすい。

マルチホップネットワークにおけるルーティング方法の基盤として、フラッディング方法が用いられている[32]。以下に、フラッディングをベースに通信経路を確立するまでの流れを示す。

【端末 A が端末 B と通信を行う際の経路構築を考えた場合】

- i) 発呼端末である端末 A は宛先として端末 B のアドレスが記述された通信要求パケットをブロードキャストで送信する。ブロードキャストとは、ネットワーク内で不特定多数の端末に向けてデータを送信することであり、宛先アドレスのないネットワーク全体を意味する特殊なアドレスを指定することで行われる。
- ii) 通信要求パケットを受信した端末はこのパケットが以前に受信したパケットでないか確認し、重複パケットである場合は破棄する。
- iii) 新しい通信要求パケットを受信した場合は、そのパケットの宛先アドレスが自端末宛でないか確認し、異なる場合はその通信要求パケットをブロードキャストで転送する。
- iv) ii と iii を宛先の端末 B が受信するまで繰り返す。
- v) 無事に端末 B まで通信要求パケットが送信されると、端末 B は到着確認パケットの宛先を端末 A として、通信要求パケットがたどってきた経路と同じ経路をたどって転送してくれた端末宛にユニキャストで送信する。または、到着確認パケットを再度フラッディングすることで端末 A へ送信する。ここでユニキャストとは、ネットワーク内で単一のアドレスを指定して特定の相手にデータを送信することである。
- vi) 到着確認パケットを端末 A が受信することで、端末 A と端末 B との通信経路が構築される。

図 2-4 に示すようにフラッディングにより送信元端末 A から宛先端末 B までにルートを確立できる。このように、通信経路を確立させるために各端末に通信要求パケットのよ

うな制御パケットが洪水のように押し寄せてくることから、フラッディングと呼ばれる。しかし、実際にはこのようなフラッディングをベースとして確立された通信経路が、必ずしも最適ルートとなるとは限らない。また、端末が移動することで経路が切断されるためルートを再構築しなくてはならない。そのたびに各端末には大量の制御パケットが押し寄せてきてしまい非常に効率が悪く、端末の負担も増す問題が生じてしまう。

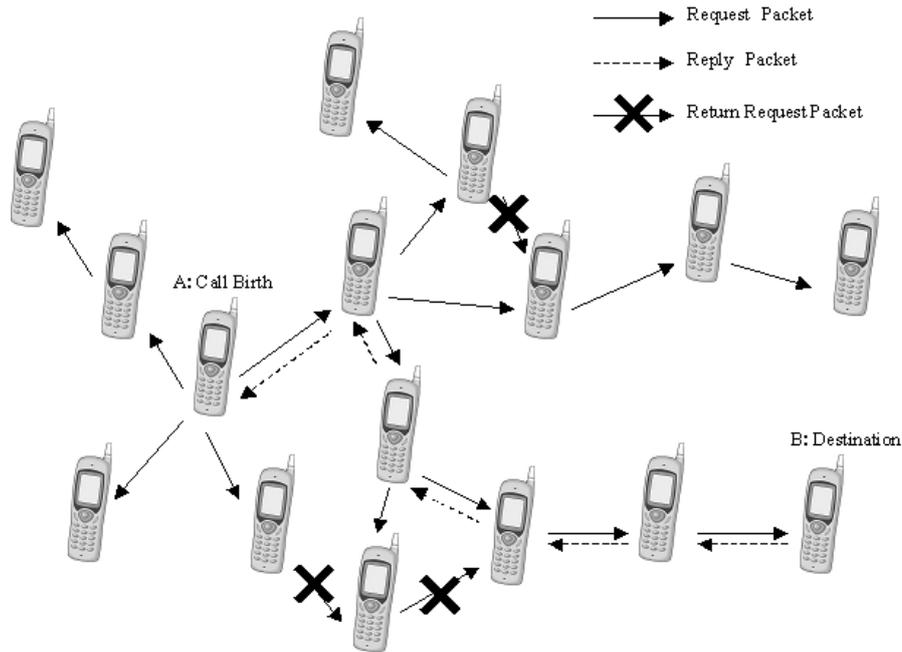


図 2-4: フラッディングによるルート構築

2.4 DSR 方式

オンデマンド方式のルーチングプロトコルである DSR 方式を紹介する。端末 A が端末 B と通信を行う場合、まず発呼端末 A は通信要求先の宛先端末 B までのルートを構築するためにルート構築要求メッセージ RREQ (Route Request) パケットをフラッディングする。宛先端末 B がこれを受信すると端末 B はパス構築応答メッセージ RREP (Route Reply) パケットを端末 A に返信する。この RREQ/RREP パケットは、それ自身が通過したすべての端末の経路を記録する。そのため、各端末は端末 A から端末 B までのルートを完璧に知ることができ、端末 A が端末 B までの全ての経路を指定してパケットを送信することができる。図 2-5 と図 2-6 に DSR によるルーチングの流れを図示し、以下に具体的なアルゴリズムを示す[34]。

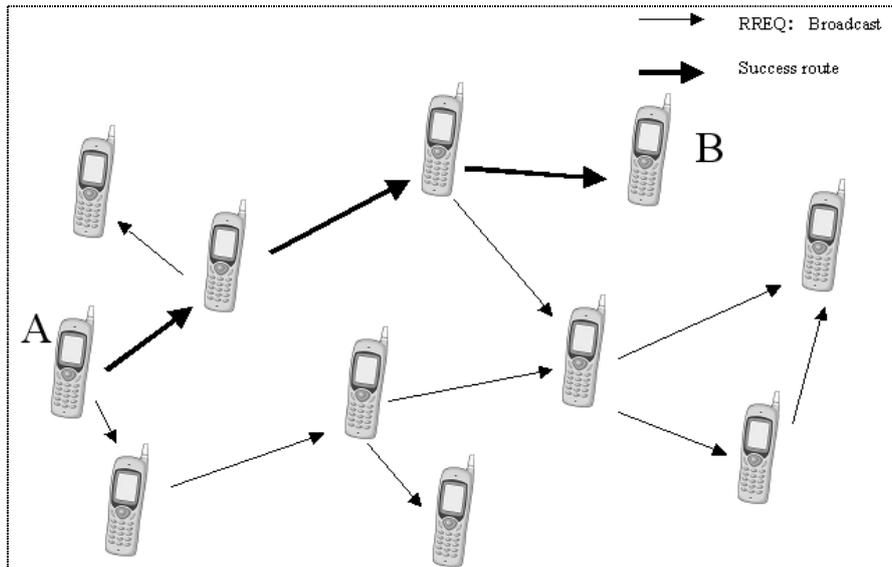


図 2-5: 宛先端末 B までのルート検索 (DSR)

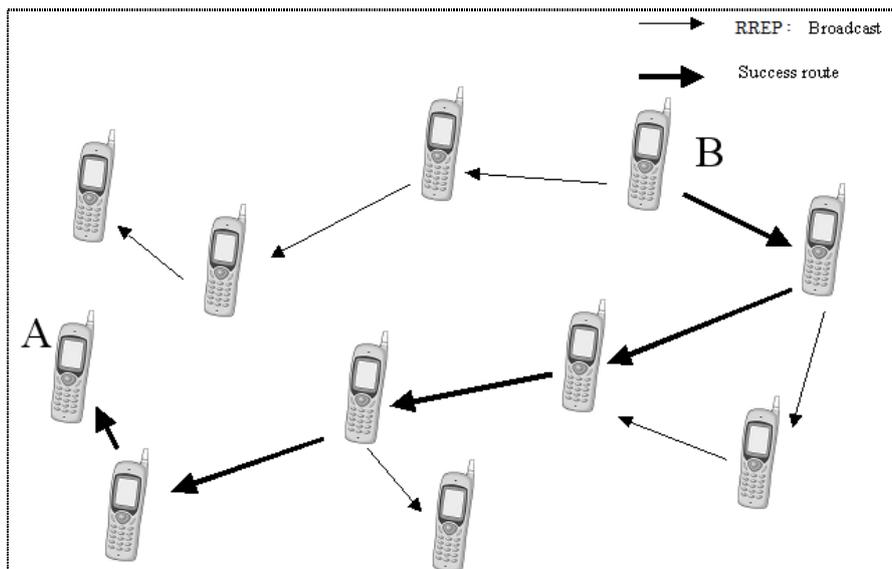


図 2-6: 発呼端末 A までのルート検索 (DSR)

- i) 端末 A は端末 B を宛先アドレスと指定した RREQ を端末の無線通信可能範囲内にある全ての端末 N_i にブロードキャストする。
- ii) N_i は RREQ を受信すると N_i の無線通信可能範囲内にあるすべての端末に RREQ をブロードキャストする。ここで、 N_i には、RREQ の転送経路を記録した端末のアドレスシーケンスが含まれる。また、 N_i は RREQ をブロードキャストする前に自端末のアドレスをこのシーケンスの末尾に加える。

- iii) 端末 B に RREQ が到達するまで ii を繰り返す。このとき、RREQ には端末 A から端末 B までのルート上にある端末のアドレスのシーケンスが含まれるので、端末 B は RREQ を受信することにより、端末 A から端末 B までのルート情報を知ることができる。
 - iv) 端末 B は、端末 A から端末 B までのルート情報を含み、端末 A を宛先アドレスとした RREP を、端末 B の無線通信可能範囲内にあるすべての端末 N ii に向けてブロードキャストする。
 - v) N ii は RREP を受信すると、N ii の無線通信可能範囲内にあるすべての端末に RREP をブロードキャストする。この際も RREQ の時と同様に、RREP にアドレスのシーケンスが含まれる。また、N ii は RREP をブロードキャストする前に、自端末のアドレスをこのシーケンスの末尾に加える。
 - vi) RREP が端末 A に到達するまで v を繰り返す。このとき、RREP には端末 A から端末 B までのルート情報と、端末 B から端末 A までのルート上にある端末のアドレスシーケンスが含まれているので、端末 A は RREP を受信することにより、端末 A から端末 B までのルート情報と、端末 B から端末 A までのルート情報を知ることができる。つまり、上りと下りの 2 つのルート情報を管理できる。
 - vii) 端末 B から端末 A までのパス情報を含むメッセージを、端末 A が端末 A から端末 B までのパスをたどってユニキャストすることにより、端末 B は端末 B から端末 A までのルート情報を知ることができる。
- 以降、端末 A と端末 B との間でそれぞれのルートを利用することで通信を行う。

2.5 AODV 方式

オンデマンド方式のルーチングプロトコルである AODV について紹介する。ルート発見には DSR と同じ RREQ/RREP パケットを用いるが、通過したルートを全て記録するのではなく、各中継端末が通信要求先の宛先端末 B に到達するためには次のどの端末に送信したらよいかをルーチングテーブルに記録する方法をとる。つまり、通信要求先の端末宛のデータパケットにはルート情報は含まれず、各中継端末のルーチングテーブルの記録にしたがってパケットが転送される。図 2-7 と図 2-8 に AODV によるルーチングの流れを図示し、以下に具体的なアルゴリズムを示す[37]。

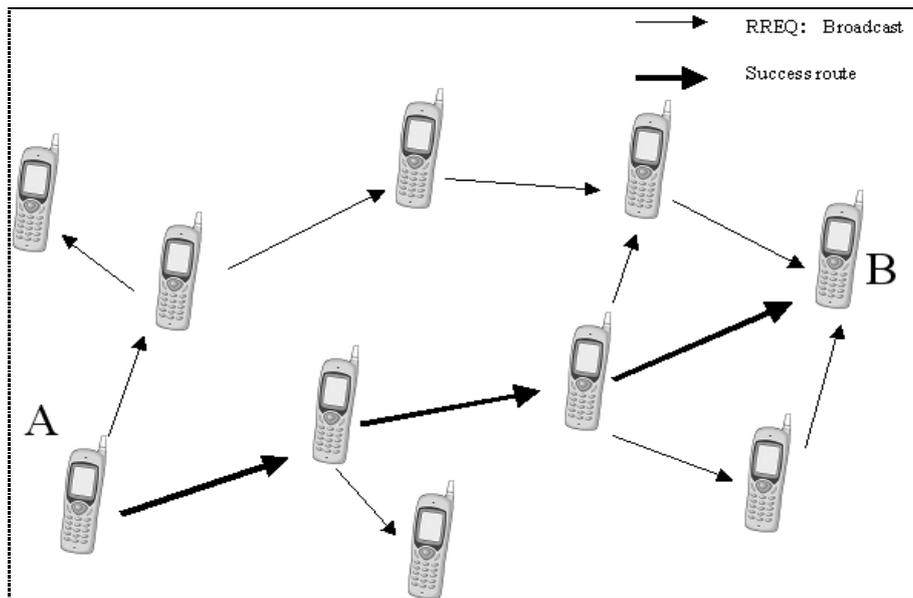


図 2-7: 宛先端末 B までのルート検索 (AODV)

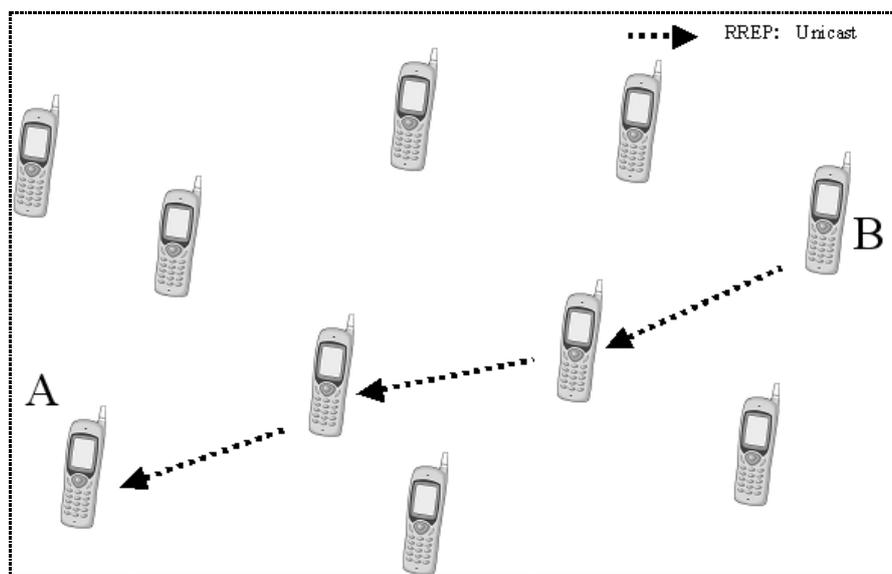


図 2-8: 発呼端末 A までのルート構築 (AODV)

- i) 端末 A は端末 B をアドレスに指定してある RREQ を端末 A の無線通信可能範囲内にあるすべての端末 N_i にブロードキャストする.
- ii) N_i は RREQ を受信すると N_i の無線通信可能範囲内にあるすべての端末に RREQ をブロードキャストする. ここで, N_i は RREQ 内の hop count を 1 だけ増やす. さらに, RREQ を生成した端末への経路として, RREQ を受け取った端末の IP

アドレスを次ホップとして経路設定しておく。(逆方向経路設定)

- iii) RREQ を受け取った端末が通信要求先の経路を保持しているか、もしくは端末 B に RREQ が到達するまで ii を繰り返す。
- iv) 端末 B までの経路が発見されると RREP により応答を返す。RREP により応答を返す端末が、途中経路の端末である場合には、ルーティングテーブルから端末 B への hop count を得て RREP を生成する。応答を返す端末が宛先端末 B である場合は、hop count が 0 の RREP を生成する。生成された RREP を、端末 A に向けてユニキャストで送信する。
- v) RREP を受け取った端末は、RREQ の中継により生成した経路で RREP をユニキャストする。この際、RREP を生成した端末への経路として、RREP を受け取った端末の IP アドレスを次ホップとして経路設定しておく。(順方向経路設定)
- vi) RREP が端末 A に到達するまで v を繰り返す。
- vii) 端末 A が RREP を受信すると、端末 B との間で RREQ/RREP が辿ったルートを利用することで通信を行う。

2.6 従来研究と課題

マルチホップネットワークのルーティングアルゴリズムとして、MANET などで AODV や DSR をはじめ、さまざまなアルゴリズムが提案されており、これらを利用した研究も数多い[5]。しかし、モバイル通信へのマルチホップネットワーク適用について、これらの提案方式が必ずしも適していない。そのため、マルチホップの特性を活かしてモバイル通信へこの技術を応用する研究がさまざまなされている[38][40][52]。[38]はマルチホップ自律分散ネットワークをモバイル通信に用いる研究がなされており、周波数利用効率の向上を示しているが、端末の移動は考慮されていない。[39]はセルラ方式の課題であるデッドスポット問題の解決のため、アドホックネットワークをセルラシステムに適用することを提案しており、この有効性が理論的に示されている。しかし、ルーティングに関する具体的な検討はなされておらず、パケットの衝突問題には触れていない。[40]はマルチホップルーティングの問題であるフラッディングの際のトラヒック急増によるパケット衝突問題の改善が議論されており、中継端末を制限することでパケット配信率やルート確保率の改善が示されているが、優先中継端末の最適選択がなされているとはいえ、ルートの決定方法が具体的に述べられていない。

本論文では、従来研究の結果を考慮しつつ中継端末選択の最適化を追求し、トポロジー変化に対応できるフレキシブルなネットワークについて考察する。そして、特にモバイル通信エリアでのマルチホップネットワーク確立に際しては、現実の無線通信環境に近づけるため電波伝搬損失を考慮する。ルーティングはフラッディングを基盤に用いるが、端末間の通信で用いる際のアクセス方式を適切に改善する。具体的にマルチホップネットワーク

第2章 マルチホップワイヤレスネットワークの概要と課題

を端末間通信に利用するためには以下の状況が考えられる。

- ◆ 移動通信なので端末の移動によりトポロジーが著しく変化する。
- ◆ 無線通信なので利用できる電波の周波数帯域には制限がある。

トポロジーが変化することにより一度構築されたネットワークでも、その変化に伴い切断時には再構築が必要となる場合がある。また、周波数の有限性から通信チャンネルには制限があり、同一チャンネルを利用した際には電波干渉による信号未受信、通信信号の衝突などといった問題が考えられる。つまり、各端末は通信チャンネルを有効に活用する必要がある。よってマルチホップネットワークを効率よく構築するため、以下の課題を検討する。

- ◆ 安定したネットワークの構築
- ◆ 通信経路の短さ
- ◆ ネットワーク確立の迅速さ
- ◆ 通信要求パケットの軽減と衝突回避
- ◆ パケットロスの削減
- ◆ 中継端末の負担減

端末の移動や変動に対応できるように、マルチホップネットワークのルーチングはオンデマンド方式を適用し、フラッディングによるパケットの流出や衝突問題について改善方法を検討する。本論文では以上にあげた課題を考慮した新たなルーチングのアクセス方式を提案し、既存のアルゴリズムとの性能を比較評価する。

2.7 むすび

マルチホップネットワークを用いればアクセスポイントを必要とせず、端末のみで自律分散的にネットワークを構築できる。本章では、マルチホップネットワークの詳細を示し、ルーチングプロトコルのオンデマンド方式とテーブル駆動方式を紹介した。モビリティを重視し、逐次トポロジーが変化しても柔軟にネットワークを構築可能とするため、オンデマンド方式に焦点をあてた。オンデマンド方式として DSR と AODV のアルゴリズムを示した。ルーチングの基本となるフラッディングについて詳しく述べ、マルチホップ特有のパケット衝突などの問題も示した。各種の通信へマルチホップを適用する際には、このような問題を解決した通信モデルの提案を行う必要があることを示唆した。

マルチホップネットワークを用いた他の研究を紹介することでマルチホップ適用の利点を示したが、マルチホップ適用時に考慮すべき条件と未解決な課題の存在も明らかとした。本論文では、マルチホップネットワークを構築する際には AODV をベースとしたアクセス方式を導入し、課題の解決を図るため、第3章、第4章、第5章ではアクセス方式の更なる改善を追求する。

第3章

ブロードキャストを用いたマルチホップ モバイル通信方式

3.1 まえがき

現在のモバイル通信は、圏外エリアでは通信が行えず、圏内エリアにいる端末であっても、デッドスポットと呼ばれるエリアにあると通信不可能となる。また基地局が災害などの影響により使用できなくなると、その基地局エリア内の端末は通信不可能となる。本章では、端末を持ち寄ることで即座にネットワークを確立できるマルチホップネットワークをモバイル通信に適用することで、デッドスポット問題を解消する「マルチホップモバイル通信モデル」を提案する。このモデルは基地局などの既存インフラも利用し、圏内端末と基地局間通信においては通常通り既存の PDC 方式を用い、端末間通信においてマルチホップネットワークを利用する。マルチホップネットワークを構築する際に既存のアクセス方式を使用したモデルと提案方式を適用したモデルとの性能を比較検討し、モデルの有効性を説く。

3.2 マルチホップモバイル通信モデルの構築

図 3-1 に示すように基地局と端末が存在していると仮定する。ここで、円に影がかかっている部分は基地局のカバーエリアを、端末を囲む円はその端末の通信可能距離を示している。端末 A から通信要求があったと仮定する。この通信要求を以後「呼」と呼び、呼を発生することを「発呼」、発呼する端末のことを「呼発生端末」と呼ぶ。また端末 A の通信可能エリア内（端末 A を囲む円内）にある端末を端末 A の「近隣端末」と呼ぶ。呼発生端末 A は圏外にあるため、通信を行いたいという通信要求パケットを通信可能距離内にいる全ての端末にフラッドイングする。このパケットの宛先アドレスは圏内端末すべてとなる。通信要求パケットを受信した端末は、自端末が圏内にあり通信を行っていない場合、中継可能であることを呼発生端末に応答する。図 3-1 では、端末 B が圏内であるため、端末 B は呼発生端末に自端末が圏内であるという応答を行い、端末 A は端末 B を中継端末

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

と決定し、図 3-1 の点線に示すように端末 A と基地局間でマルチホップネットワークを構築する。

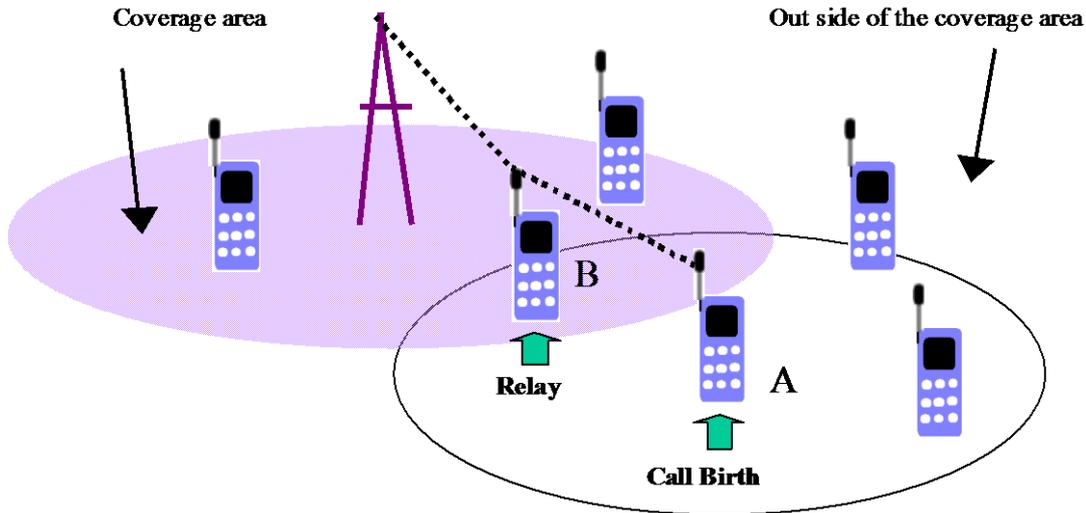


図 3-1: 基地局とのネットワーク構築 (1hop)

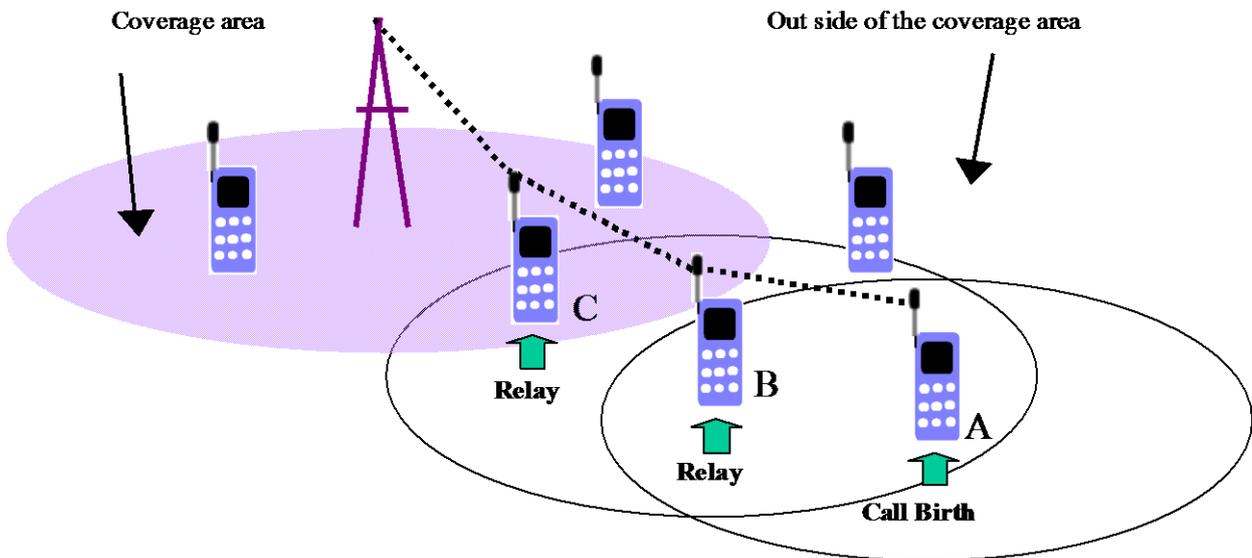


図 3-2: 基地局とのネットワーク構築 (2hop)

図 3-2 の場合のように、端末 A の通信可能範囲内に圏内端末がない場合は、通信要求パッケージがフラグディングされることで、圏内にある端末 C がこの通信要求パッケージを受信できる。端末 C は自端末が圏内であるという応答を端末 B に返信し、端末 B は端末 A

に圏内端末が見つかった応答を行う。これにより、圏外端末 B と圏内端末 C とを中継端末として決定することで、図 3-2 の点線のように基地局とのネットワークを確立する。この際の、中継端末間のルートの数を hop 数といい、図 3-1 は 1hop で、図 3-2 は 2hop で通信を行っている。ここで、各端末が圏内端末を検索する動作は、呼を発生した時のみとするため、本モデルではマルチホップネットワークを利用して満たすことのできる通話要求は上りのみとし検討を進める。本モデルでは呼を発生した端末が圏外である場合、近くの圏内端末を検索し、発見できれば圏内端末と途中の端末を中継端末として決定し、端末間通信にマルチホップネットワークを利用することで、圏外端末-基地局間通信を実現する。

3.2.1 PDC 方式

現在用いられているモバイル通信形態は、基地局により半径数 km の小ゾーン方式が採用されており、サービスエリアはこの小ゾーンの集まりから形成される。基地局と携帯端末間通信においては、日本ではデジタル携帯電話の通信方式として PDC 方式が採用されている。PDC 方式は、携帯端末と基地局間において上り周波数に 1.5GHz 帯を、下りに 800MHz を利用している。デジタル信号通信にはパケット通信が利用されており、50kHz 間隔で多数の周波数電波を出している。デジタル信号は 1 つのキャリアに対し、ハーフレート方式を用いれば 6 チャンネル分多重化して伝送することができる[17]。図 3-3 はフルレート方式の場合を示す。ハーフレート方式の場合はチャンネルの時間軸を半分にして、チャンネル 1 からチャンネル 6 とする。本論文では 1 つの小ゾーンを対象とし、基地局携帯端末間通信は既存の PCD 方式を利用する。

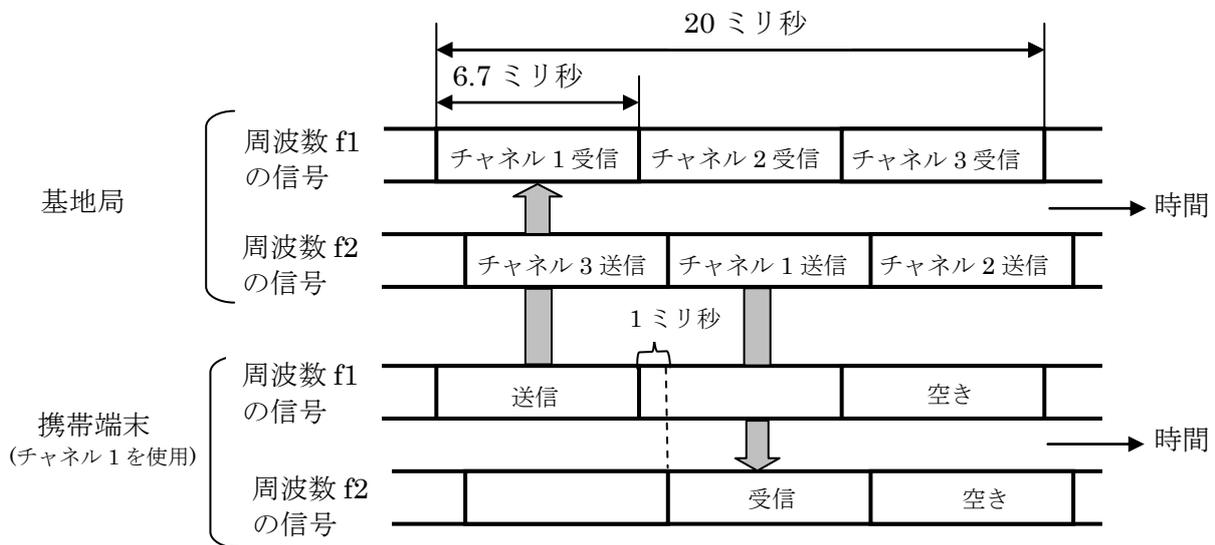


図 3-3: フルレート方式

基地局と端末間通信に PDC 方式を採用することから、マルチホップを用いた端末間通

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

信においても同様にパケット通信を採用する。中継端末を介して通信を行う際にはその中継端末が基地局と通信を行っていない空きスロットを利用するが、無線通信を行う際、無線チャンネルには制限があることを考慮しなければならない。基地局一端間通信において、チャンネルの割り当て制御は、既存の方式に基づき行われるが、端末間通信においては、チャンネルの有効利用について定義する必要がある。このことは 3.2.2 で詳しく説明する。また情報交換にはパケット交換方式を利用し、スロット同期がとれていることを前提とする。

3.2.2 制御パケットの構成と制御チャンネル割り当て

無線通信におけるパケット通信は、基地局から各端末への下り送信については、基地局で蓄積交換を行うことにより、複数の端末に対しても順次パケットを送信することができるのでパケットの衝突は起こらない。しかし、無線端末から基地局への上りは多数の端末がマルチアクセスするため、何らかの制御が行われないうり、ある確率でのパケット衝突が生じてしまう。この衝突による通信効率の低下をできる限り避けるために考案されたのがマルチアクセス方式である。この方式は図 3-4 に示すように分類される。

マルチホップネットワークを利用することで、各端末にさまざまな機能の搭載が予測される。そこで本論文では端末への負荷を軽減するため、マルチアクセス方式はランダムアクセス方式を用いる。また、PDC 方式を採用していることからパケット交換方式にはスロットアロハ方式を用いる。

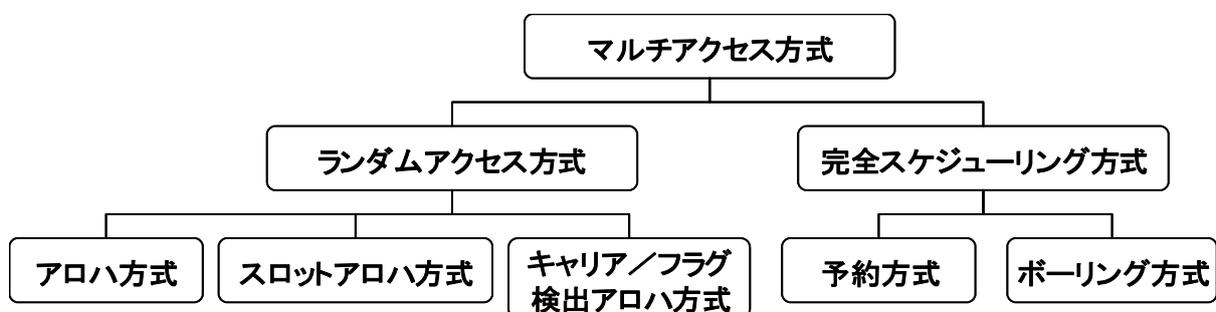


図 3-4: マルチアクセス方式

マルチホップモバイル通信に適したルーティングプロトコルとして既存の AODV や DSR は、Route Request / Route Reply パケットと呼ばれる呼発生端末の IP アドレスなどを含んだ RREQ, RREP を用いて経路検索を行っている。図 3-5 に RREQ パケットの標準構成を記す[7]。RREQ パケットの Destination IP Address には送信先の IP アドレスが記されるはずだが、本モデルは検索端末を任意の圏内端末とするため、このヘッダには圏内端末を示すアドレスを付加する。圏内端末が RREQ パケットを受信すれば、自端末宛のパケットとして判断し返信する。そのため、通常の RREQ パケットとは異なるフォーマットに

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

設定する必要がある。よって、本論文では RREQ パケットと区別するために、この制御パケットを「通信要求パケット」と呼ぶ。また通信要求パケットを受信した場合、その送信元の端末を「依頼端末」と呼ぶ。通信要求パケットの主な構成は、通話要求パケットであることを示すヘッダ、呼発生端末のアドレス、依頼端末のアドレス、hop カウント数、パケットの有効期限である。hop 数やパケット有効期限に関する定義は、AODV の RREQ 構造の定義に準ずる。圏内端末からの応答には、AODV の RREP パケットを用いる。また、ネットワーク構築のために送受信される通信要求パケット、RREP パケットなどを総じて「制御パケット」と呼ぶ。

Type	J	R	G	Reserved	Hop Count
Broadcast ID					
Destination IP Address					
Destination Sequence Number					
Source IP Address					
Source Sequence Number					
Information					

図 3-5: RREQ パケットの標準構成

また無線通信では、周波数の有限性から利用できるキャリアには限りがあるため、限られたキャリアを有効に利用する必要がある。現在のセルラシステムでは、通話用の無線チャンネルとは別に制御用の無線チャンネルが設けられている。以下にその内訳を示す。

- ◆ 通話チャンネル
音声及びデータを送受信するために必要なチャンネル。
- ◆ 制御チャンネル
着信制御チャンネルと発信制御チャンネルの 2 種類がある。着信制御チャンネルはゾーン内のサービス内容および着信に関する情報報知に用いられ、発信制御チャンネルでは端末からの発信および位置登録動作に必要な信号の送受信が行われる。

本モデルは制御パケットを送信するための制御チャンネルと、通話のための通話チャンネルを設ける。ここで、多くの通話要求に応じることが可能となるよう、限られたチャンネルの中でも通話チャンネルは極限まで増やしたい。そこで、制御チャンネルは 1 本で、通話チャンネルは十分存在するとして定義し検討を進める。つまり呼発生端末ないし依頼端末が送信する制御パケットは、端末間通信用でローカル的に用意された 1 本の制御チャンネルを利用し送信する。

呼発生端末をはじめとする圏外端末間において、はじめは基地局との同期が得られていないが、圏内端末を発見し基地局からの制御を受けると、圏内端末に同期させ、基地局と

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

の通話を開始する。基本的に基地局－圏外端末間通信は、基地局－圏内端末間通信とは別のローカルな圏外中継用通話チャンネルを用い、基地局－圏内端末間通信における送受信の間隔をぬったタイミングで通話パケットの送受信を行う。そのため端末は、時間的な排他制御と圏外中継用通話チャンネル割り当て制御を行う必要がある。ただし、本モデルでは前提として端末による時間的な排他制御は可能であり、圏外中継用通話チャンネルは十分存在するとする。通話の前提として、既存の TDMA に基づき 6 チャンネル内の 1 チャンネルを利用して通話パケット送信を行う。また、マルチホップを利用し今まで通話不可能であった圏外端末が通話可能となることで、基地局のチャンネル割り当て等の制御負荷が増すが、基地局は通話を行っている圏内端末が圏外端末の中継端末であるかは意識せずに通常通りに対応することで、呼発生率の上昇に対しても平常時と同様な対処ができるとして検討を進める。

3.2.3 電波伝搬損失

移動通信は電波を利用した無線通信となる。ここでは、その電波の伝搬特性について説明する。また、移動通信においては、基地局から送信された電波は空間を通り、直接到達するものと、建物で反射したり拡散したりして到達するもので構成される。すなわち、アンテナに到達した電波はさまざまな方向から異なる通路長を通過して到来し合成されたものである。この合成された複雑な伝搬損失を簡単に計算するための実験式が提案されており、本論文では池上モデルと平面大地伝搬モデルを用いる[1][28]。

はじめに送信機と受信機に何も隔たるものがなく、両者見通し内にある場合である自由空間での伝搬特性について解説する。次に、池上モデルと平面大地伝搬モデルについて詳しく述べる。

◆ 自由空間損失

無指向性で損失のないアンテナに $P_t[W]$ の電力が供給された場合、アンテナから送信された電波は、空間を伝搬していく。アンテナから $d[m]$ の距離にある球面を通過する全電力は P_t であるから、その面上の単位面積あたりの電力は $\frac{P_t}{4\pi d^2} [W/m]$ になる。送信アンテナに利得 G_t のものを用いると、電力密度は G_t 倍になる。この電波を実効面積 A_{er} のアンテナで受信すると、受信電力 $P_r[W]$ は

$$P_r = A_{er} \left(\frac{G_t P_t}{4\pi d^2} \right) \quad (3-1)$$

となる。

ところで、実効面積 A_{er} とアンテナ利得 G_r とは

$$G_r = \frac{4\pi A_{er}}{\lambda^2} \quad (3-2)$$

の関係があるので、式 (3-2) から受信電力は

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_r G_t P_t$$

$$= \frac{G_r G_t P_t}{L_f} \quad (3-3)$$

と求まる。ただし、 λ は波長[m]で、 L_f は自由空間伝搬損失と呼ばれ次のように与えられる。

$$L_f = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi f d}{c}\right)^2 \quad (3-4)$$

ここで、 c は光速で、 f は周波数[Hz]である。自由空間損失をデジベル表示にすると

$$L_f = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 32.4 + 20 \log d + 20 \log f \quad (3-5)$$

となる。

ただし、この計算式において周波数はMHz、距離はkmとなる。

この L_f を使用して、式(3-1)をデジベル表示にすると

$$P_r[dB] = P_t[dB] + G_t[dB] + G_r[dB] - L_f[dB] \quad (3-6)$$

が得られる。本モデルにおいて、携帯アンテナは無指向性のものを用いるため、アンテナ利得は0[*gain*]とする。

◆ 池上モデル

回析理論を用いて建物高や道路幅等の市街地の状況を考慮に入れた伝搬損失の推定法である。伝搬損失 L は基地局と移動局間にある建物による回析損失 L_{rts} と、移動局近傍の建物と移動局間の回析や反射を伴う損失 L_{msd} と、自由空間損失 L_0 を用いて

$$L = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad (3-7)$$

で表される。

また、池上モデルで用いる変数を以下のように定義する。

b : 建物間隔[m]

w : 道路幅[m]

h_{roof} : 建物高[m]

h_b : 基地局アンテナ高[m],[4~50m]

h_m : 移動局アンテナ高[m],[1~3m]

θ : 道路角[$^\circ$],[$0^\circ \sim 90^\circ$]

d : 基地局~移動局間距離[km],[0.02~5km]

f : 周波数[MHz],[800~2,000MHz]

$$\Delta h_b = h_b - h_{roof} \quad (h_b > h_{roof})$$

$$\Delta h_m = h_{roof} - h_m \quad (h_{roof} > h_m)$$

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

これらの変数と数式を利用すれば、 L_{rts} 、 L_{msd} 、 L_0 は

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) = 32.4 + 20 \log d + 20 \log f \quad (3-8)$$

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_m + \begin{cases} -10 + 0.354\theta & (0 \leq \theta < 35^\circ) \\ 2.5 + 0.075(\theta - 35) & (35 \leq \theta < 55^\circ) \\ 4.0 - 0.114(\theta - 55) & (55 \leq \theta \leq 90^\circ) \end{cases} \quad (3-9)$$

$$L_{msd} = 54 - 18 \log(1 + \Delta h_b) + 18 \log d - 9 \log b + \begin{cases} [-4 + 0.7(f/925 - 1)] \log f & (\text{中小都市}) \\ [-4 + 1.5(f/925 - 1)] \log f & (\text{大都市}) \end{cases} \quad (3-10)$$

で導くことができ、池上モデルにおける伝搬損失はこれらの式と式(3-7)から求められる。

◆ 平面大地伝搬モデル

平面伝搬とは、基地局と移動局が見通し内にあり、かつ地面からの反射が1波存在する場合の伝搬路である。直接波と地面からの反射波が、その他からの反射波や回折波に比べて十分大きい場合に適用できる。

この伝搬損失 L は

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - 10 \log \left\{ 1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos \left(\frac{2\pi \Delta l}{\lambda} \right) \right\} \quad (3-11)$$

で与えられる。

ここで、 $\lambda d < h_b, h_m$ の領域では $\frac{2\pi \Delta l}{\lambda}$ の位相関係により、伝搬損失は激しく変動するが、

その包絡線は

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - 20 \log(1 + \gamma) \quad (3-12)$$

で表される。

一方、 $d \gg h_b, h_m$ 領域では、反射面が地面にほとんど水平に入射し、その場合の反射係数は-1に近似できる。この関係を用いて伝搬損失は

$$L = 20 \log \left(\frac{d^2}{h_b h_m} \right) \quad (3-13)$$

と、簡易になる。

式(3-11)と式(3-13)から分かるように、平面大地伝搬モデルでは、ある距離を境に伝搬傾斜が d から d^2 に変わる。この斜面の変わる位置はブレイクポイントと呼ばれ、平面大地伝搬における基本的な評価パラメータのひとつである。このブレイクポイントまでの距離は

$$b_p = \frac{2\pi h_b h_m}{\lambda} \quad (3-14)$$

のように近似される.

3.2.4 受信信号レベルとビット誤り率

実際に無線通信を行う上で重要となる, 送信信号電力と受信信号電力との関係を説明する[28][29]. 変調方式にはアナログ信号を伝送するアナログ変調方式とデジタルデータの伝送や, アナログ信号を標本化してデジタル信号に変換してから伝送する, デジタル変調方式がある. 伝送特性を評価する代表的な指標として, 前者は復調後の信号電力対雑音電力比である SN 比 (signal-to-noise ratio) を, 後者はビット誤り率が用いられる. デジタル復調方式には, 送信データに応じて, それぞれ搬送波の振幅, 周波数, 位相を離散的に変化させる ASK (amplitude shift keying), FSK (frequency shift keying), PSK (phase shift keying) がある. 本論文では基地局一端末間通信に PDC 方式が定める $\pi/4$ シフト QPSK を採用する.

ここで, この QPSK 方式でのビット誤り率 P_E は通常

$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \quad (3-15)$$

で表される. ここで, γ は伝送路中の搬送波電力対占有帯域幅雑音電力比 C/N である. C/N は, 変調された信号品質を求める際に重要な役割をする. ここで, 求め方について説明する[20][21].

アンテナで受信された搬送波電力は式 (3-6) から $P_r [W]$ として求められる. ここで, 雑音電力 $P_N [W]$ は, システム雑音温度 $T_e [K]$ を使用して

$$P_N = kT_e B \quad (3-16)$$

と求められる. ただし, k はボルツマン定数 ($=1.38 \times 10^{-23} [W/Hz-k]$) で, B は受信機帯域幅 [Hz] である. このほかに, 受信機の雑音特性を表現するのに, 雑音指数 F がある. 雑音指数は, 増幅器から出力される全雑音 (=増幅器自体で発生する雑音出力+入力に接続された信号源の雑音) と, 信号源からの寄与分に相当する出力雑音の電力比とが定義される. この雑音指数を使用すると, 雑音電力は

$$P_N = kTBF \quad (3-17)$$

と表される. ただし, この場合の T は, 受信アンテナの絶対温度 [K] になる.

以上より, C/N は P_r と P_N から

$$C/N = \frac{P_r}{P_N} \quad (3-18)$$

で求めることができる.

また, ビット誤り率を C/N ではなく, 情報 1 ビットあたりの電力対単位 [Hz] あたりの雑音電力密度の E_b/N_0 で評価するものもある. $\pi/4$ シフト QPSK 方式の場合, C/N と E_b/N_0 の関係は

$$E_b/N_0 = \frac{1}{2}C/N \quad (3-19)$$

で表される。つまり、 C/N は E_b/N_0 より3[*dB*]大きくなるのがわかる。

本モデルでは、基地局、端末それぞれの受信信号電力算出し、実際の無線通信の電波伝搬を考慮して通信のネットワークの構築を図る。

3.3 既存技術 AODV 適用型モデル

マルチホップモバイル通信モデルにおいて圏内端末検索に既存のルーチングアルゴリズムである AODV をベースに用いた「AODV 適用型モデル」を提案する。3.2.2 であげた新たな通信要求パケットを用いて、圏内端末とのネットワーク構築を図る。

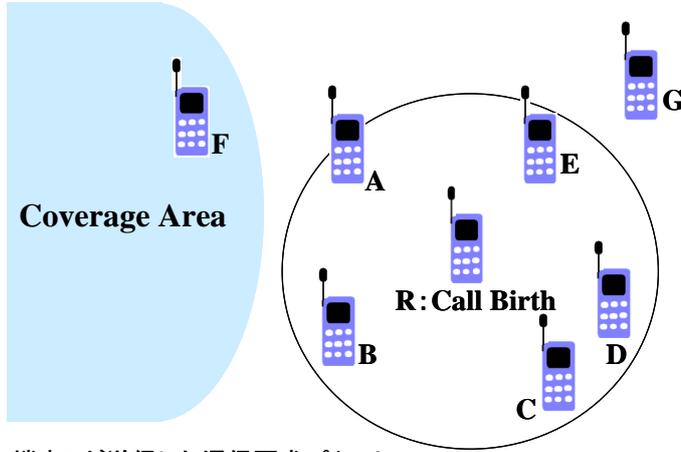
3.3.1 モデルの概要

本モデルでは、圏外にある呼発生端末は AODV 方式を用いて、圏内端末が現れるまで通信要求パケットをフラッディングにより転送する。通信要求パケットを受け取った端末は hop 数をインクリメントし、パケットの有効期限を減らす。通信要求パケットは hop 数の制限が Max_hop に達するか、パケット有効期限が切れるまでフラッディングされる。呼発生端末への RREP 応答がない場合は、再度、通信要求パケットを送信しこれを繰り返す。ある一定時間待っても、近くに圏内の端末が存在しないため RREP 返答がない場合は、通常通り圏外のため通話不可能となる。

具体的に図 3-6 の圏外端末 R が発呼した場合について、AODV 適用型モデルのネットワーク構築までの流れを述べる。端末 R を囲む円は、端末 R の通信可能エリアであり、Max_hop は 3hop、パケットの有効期限を 100slot とする。

- i) 端末 R は近隣端末に図 3-6 に示された通信要求パケットをブロードキャストする。
- ii) 通信要求パケットを受け取った圏外端末は、呼発生端末のアドレスとシーケンス番号を比較して判断し、重複パケットである場合は破棄する。重複でない場合は依頼端末を自端末アドレスに変換し、図 3-7 のように新たに通信要求パケット作成して近隣端末にブロードキャストする。この際、各端末は逆方向経路設定として、受信した依頼端末のアドレスをルーチングテーブルに載せる。
- iii) 図 3-7 の端末 F は圏内であるため RREP を依頼端末 A に送信する。端末 A は端末 F から RREP 応答を受信すると、ii)においてルーチングテーブルに記載した逆方向経路をもとに依頼端末へ RREP を転送することで、最終的に呼発生端末へ RREP を送り届ける。
- iv) 端末 R は RREP を受け取ると、中継端末に端末 A と端末 C を決定して図 3-8 の点線で示すように 2hop でネットワークを構築し通話開始する。

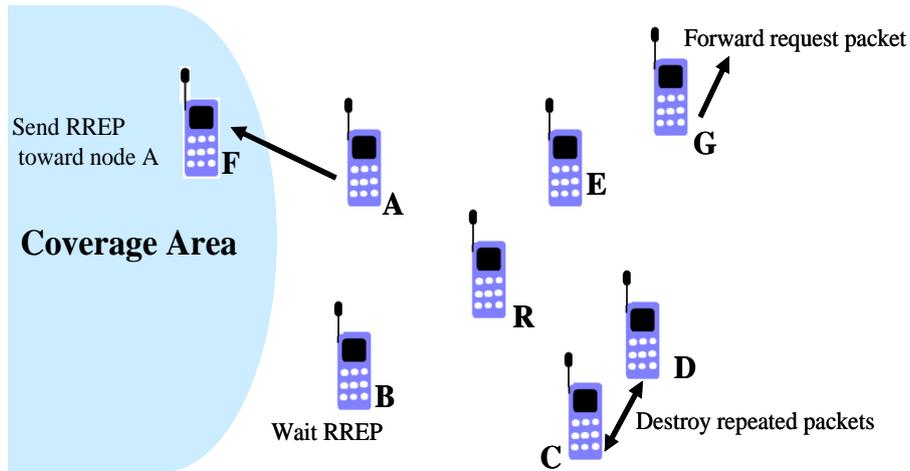
v) もしパケットの有効期限以内に RREP 応答が無い場合は, i) を数回繰り返す.



端末Rが送信した通信要求パケット

hop数:0hop	宛先:圈内端末	依頼端末:R	呼発生端末:R	有効期限:100slot
-----------	---------	--------	---------	--------------

図 3-6: 呼発生端末による通信要求パケットの送信



端末A

hop数:1hop	宛先:圈内端末	依頼端末:A	呼発生端末:R	有効期限:100 - Time(a)
-----------	---------	--------	---------	--------------------

端末B

hop数:1hop	宛先:圈内端末	依頼端末:B	呼発生端末:R	有効期限:100 - Time(b)
-----------	---------	--------	---------	--------------------

端末C

hop数:1hop	宛先:圈内端末	依頼端末:C	呼発生端末:R	有効期限:100 - Time(c)
-----------	---------	--------	---------	--------------------

端末D

hop数:1hop	宛先:圈内端末	依頼端末:D	呼発生端末:R	有効期限:100 - Time(d)
-----------	---------	--------	---------	--------------------

図 3-7: 通信要求パケット受信端末の動作と転送される通信要求パケットの構成

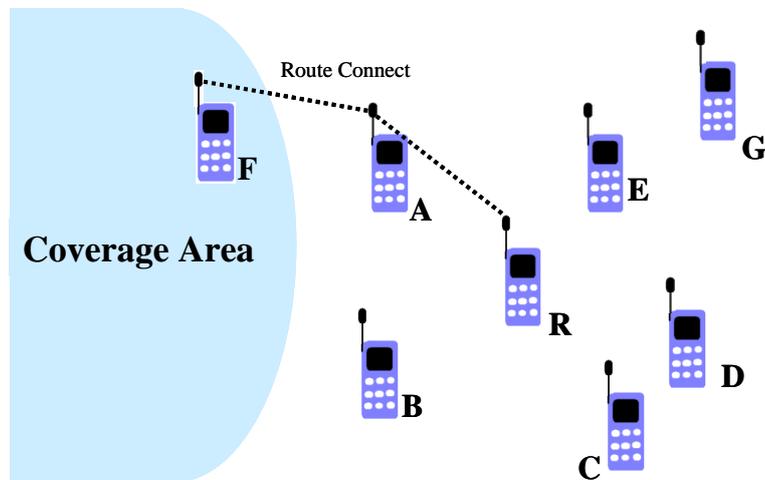


図 3-8: 2hop で通信開始

前提として、既に他の端末の中継端末となっている、または通話中である端末は、通信要求パケットの転送を行わず中継端末にはならない。隠れ端末の問題による通信要求パケットの未受信を防ぐために、通信要求パケットを複数回送信し、随時ルーチングテーブルを更新させる。通話時の通信方式は、PDC方式に基づき基地局と端末間の通信は6チャンネルTDMAを用いる。携帯端末間通信でも同様に6チャンネルTDMAを適用する。また、通信経路確立には制御チャンネル、通話時は通話チャンネルとして異なった周波数チャンネルを利用する。

3.3.2 シミュレーション諸元

表 3-1 に示すパラメータをベースにしてシミュレーションを行う。端末はフィールド内にランダム配置され、8方向をランダムに選択し、その方向に向けて一定の速度で移動する。シミュレーションフィールドから外れた場合は 180° 方向を変えることで、必ずフィールド内を移動する。基地局はシミュレーションフィールドの中央に1機配置する。呼発生端末は呼発生率からポワソン分布で発呼し、平均通話時間の指数分布を利用することで通話時間を求める。ここで、本章で考慮する伝搬損失モデルとして、基地局と端末間通信に池上モデルを、端末同士の通信に平面大地伝搬モデルを適用する。複数の端末が発するパケットが同タイミングで到着する場合はパケット衝突として未受信となる。

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

表 3-1: シミュレーションパラメータ

フィールド	1000 [m] × 1000 [m]
端末の移動速度	4 [km / h]
端末の移動方向	8 方向—ランダム決定
基地局の位置	(500 [m] , 500 [m])
周波数帯域幅	25 [kHz]
シミュレーション時間	変動
Slot 間隔	0.01 [sec]
基地局-端末間通信方式	PDC 方式
端末間通信方式	1 本の制御チャンネル 十分な通話チャンネル TDMA 方式
平均通話時間	180 [sec]
呼発生率	0.00000065
所要 E_b / N_0	3 [dB]
伝搬損失	< 基地局—端末間 > 池上モデル < 端末間 > 平面大地伝搬モデル
基地局電力	1000 [mW]
端末電力	100 [mW]
パケット有効期限	5 [sec]
パケット送信回数	1-3 回
Hop 数	1-3hop
端末数	50—30000

3.3.3 シミュレーション結果及び課題の考察

呼発生端末ないし依頼端末が圏外の場合，通信要求パケットを近隣端末にブロードキャストするが，実際にはパケット衝突問題により，ある任意の近隣端末は通信要求パケットを受信できない可能性がある．そこで，近隣端末に確実に通信要求パケットを受信させるため，同パケットを数回ブロードキャストすることで，この問題の解決を図る．この際，呼発生端末ないし依頼端末が一度目にブロードキャストした通信要求パケットを新規パケット，再度ブロードキャストした通信要求パケットを新規パケットと区別するため再送パケットと呼び，新規パケットと再送パケットを含めパケットを送信する送信回数の制限値を送信制限と呼ぶ．呼発生端末は通信要求パケット送信を行っている途中で圈内応答を受けると通信要求パケット送信を中止して通話を開始する．

AODV 適用型モデルの性能を計算機シミュレーションにより検討する．評価方法としては以下の方法を用いた．

- パケット送信成功率 (Packet Success Rate) = 総送信制御パケット数あたりの正確に届いたパケット数の割合
- パケット衝突率 (Packet Collision Rate) = 制御パケットが送信された総スロット数あたりのパケット衝突が起きたスロット数の割合
- ルート構築率 (Route Establishment Rate) = 圏外端末が呼を発生して圈内端末とのルートを構築する際の，ルート構築要求数あたりの圈内端末が見つかりルートを構築できた数の割合
- 通信接続率 (Channel Availability) = 希望通話時間あたりの成功通話時間の割合

ここで総送信制御パケット数とは，通信要求パケットを送信する呼発生端末や依頼端末の近隣端末 1 端末に対し 1 パケット送信するとした場合の総パケット数であり，確実に届いたパケット数とは，衝突せずに送り届けられた総パケット数を表している．

本章においては比較の基準を設けるためホップ数の制限を 3hop までとして，制御チャネル上での制御パケットの影響について性能評価を行う．

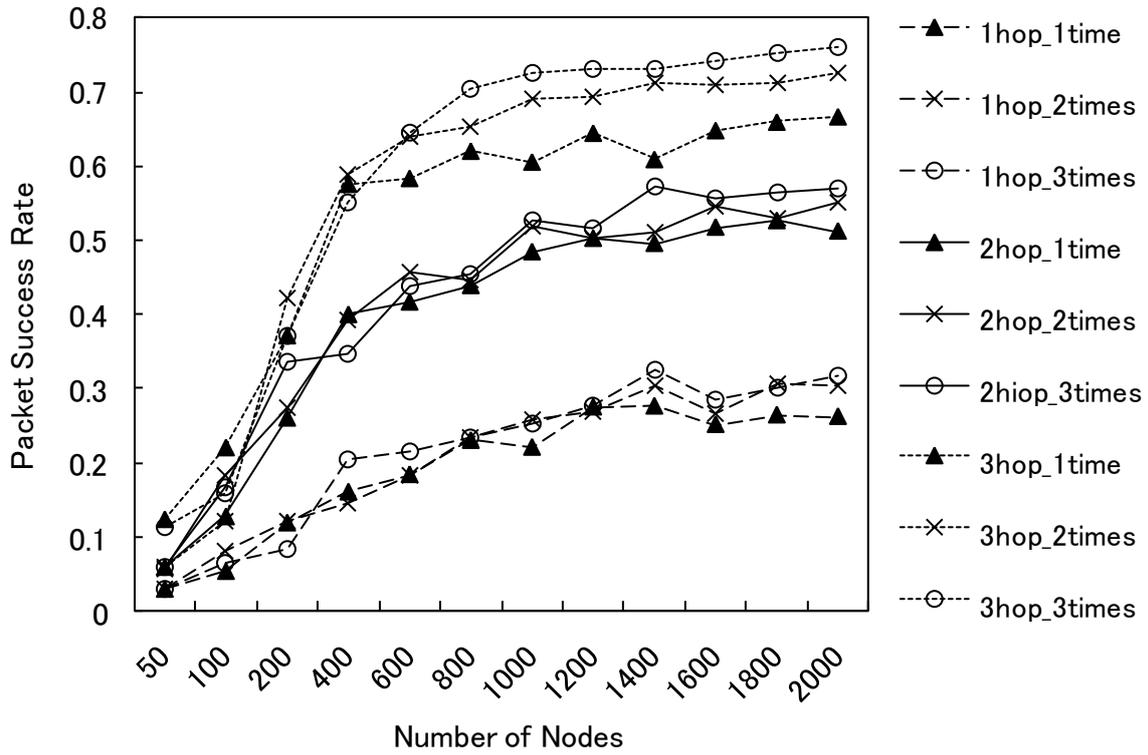


図 3-9: 送信回数別パケット送信成功率

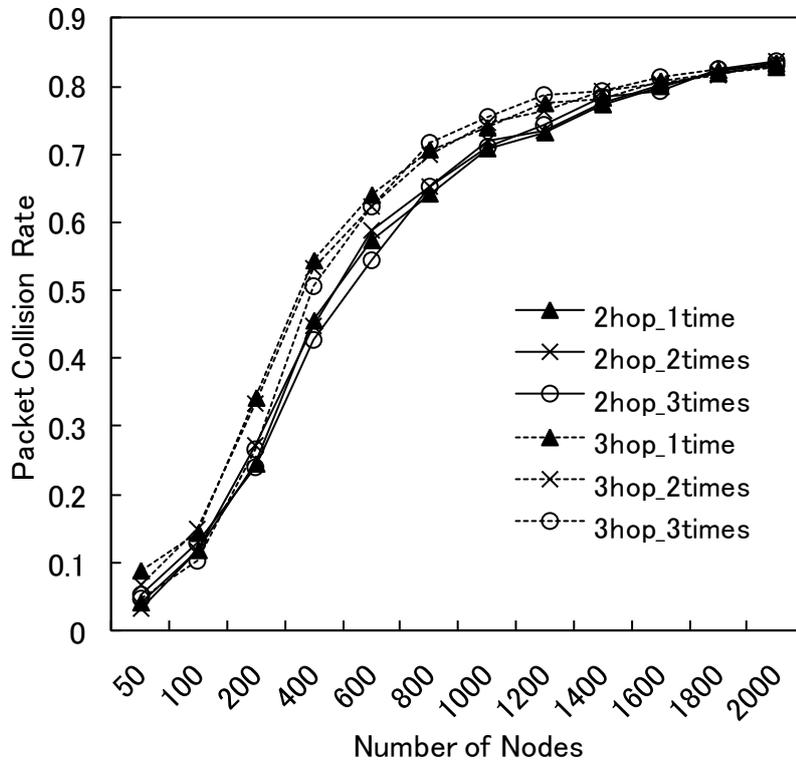


図 3-10: 送信回数別パケット衝突率

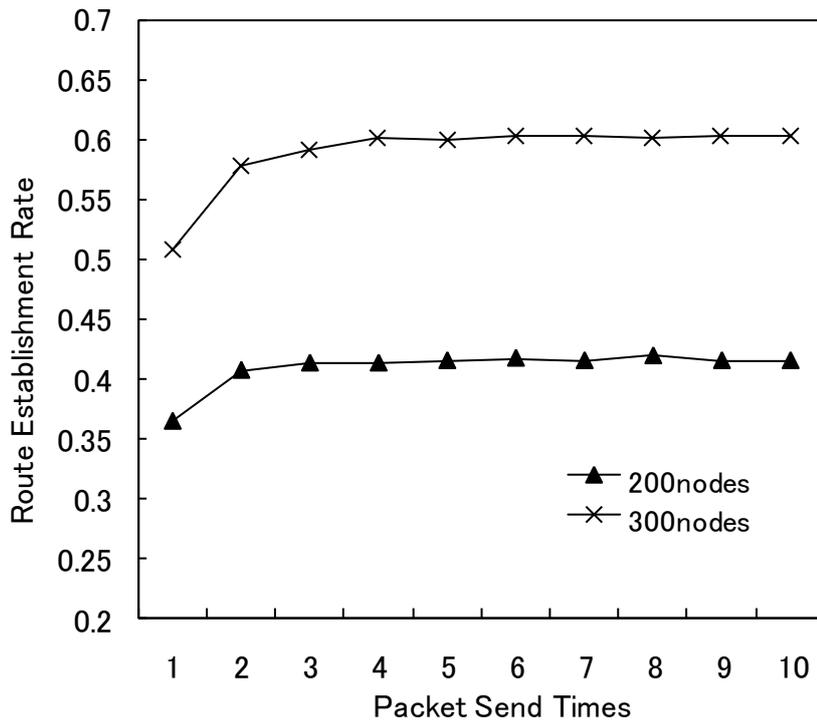


図 3-11: 送信回数別ルート構築率

図 3-9 は、制限 hop 数を 1hop から 3hop までとした際の通信要求パケットの送信回数別パケット送信成功率を、図 3-10 は 2hop, 3hop までと制限したパケット衝突率を表している。図 3-9 から、1hop, 2hop では送信回数を変化させてもパケット送信成功率に目立った違いは見られないが、3hop 時に至っては、端末が増加するに依り 1 回送信と比べ 3 回送信したほうが最大で 1 割ほど成功率が向上することが読み取れる。また図 3-10 から、パケット衝突率は 2hop の場合は端末増加に伴い、急激に増加している。3hop も同様、急激に増加しており、その割合は 2hop に比べてやや大きい。よって、ホップ数の制限を増やせばパケット送信成功率は向上するがパケットの衝突率が高くなることがわかった。しかし、パケット送信回数の違いに焦点をあてると、図 3-10 から、通信要求パケットの送信回数が 3 回までならばパケット衝突率への影響は 2hop も 3hop もないといえる。また図 3-11 は送信回数あたりのルート構築率を求めたグラフである。送信回数を増加させることでルート構築率が向上することが示されているが、送信回数が 3 から 5 回あたりでルート構築率は最大値に達しており、これ以上回数を増やしても良い効果が得られないことが読み取れる。つまり通信要求パケットの送信回数を適度に増やすことはネットワーク性能が向上するが、本シミュレーションモデルにおいては送信回数を 3~5 回にすることが有効であると示された。パケット送信制限の違いのみに焦点をあてると、送信回数の制限が 3 回までであればパケット衝突率へ与える影響は少なく、更に送信回数の制限を増やすことでパケット送信成功率が向上しルート構築率も増えることがわかった。

しかし、送信回数の制限を増やせば必ずしもパケット送信成功率が向上するとはいえず、送信制限値増加の影響で、パケット送信成功率はいずれ頭打ちになる。理由として、圏外の呼発生端末は圏内端末が発見されるか送信制限が上限値に至るまで通信要求パケット送信を繰り返すが、一度経路が確立されて通話が開始されると通信要求パケット送信を終了する。そこで、経路を検索する全ての圏外端末が経路発見できると仮定すると、送信制限値をいくら上げても性能はほぼ変わらないためパケット送信成功率は収束すると考えられる。しかし、経路を発見できない端末が存在すると、その端末は通信要求パケット送信を送信制限値に至るまで繰り返す。つまり、送信制限を増加させればさせるだけ、経路を発見できない端末が送信する制御パケット数が増加し、最終的には、比較の対象となる全制御パケットの割合が増えるためパケット送信成功率は頭打ちとなると考えられる。ただし、本シミュレーションモデルの範囲内においては、ルート構築率が高いため頭打ち状態には至っていない。送信制限を増加させればパケット衝突率が悪化してしまうおそれもあるが、本モデルでは送信制限値をパケット衝突率に影響のない3回までと設定して、モデルの性能向上について検討を進める。以上のことから、パケット送信成功率向上のため通信要求パケットを数回送信することが有意義であることが示された。

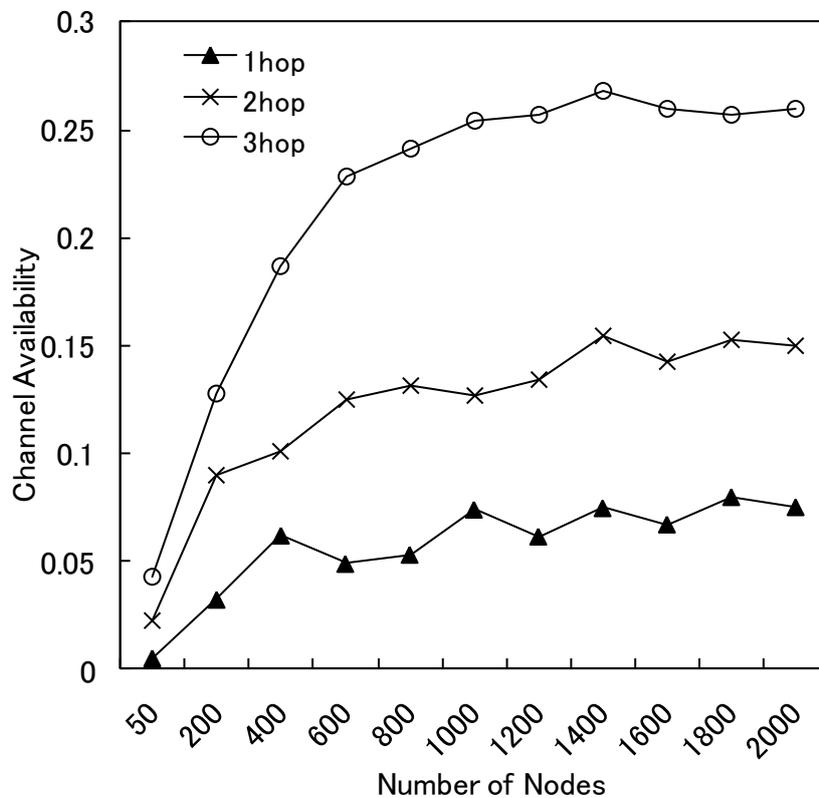


図 3-12: hop 数別通信接続率

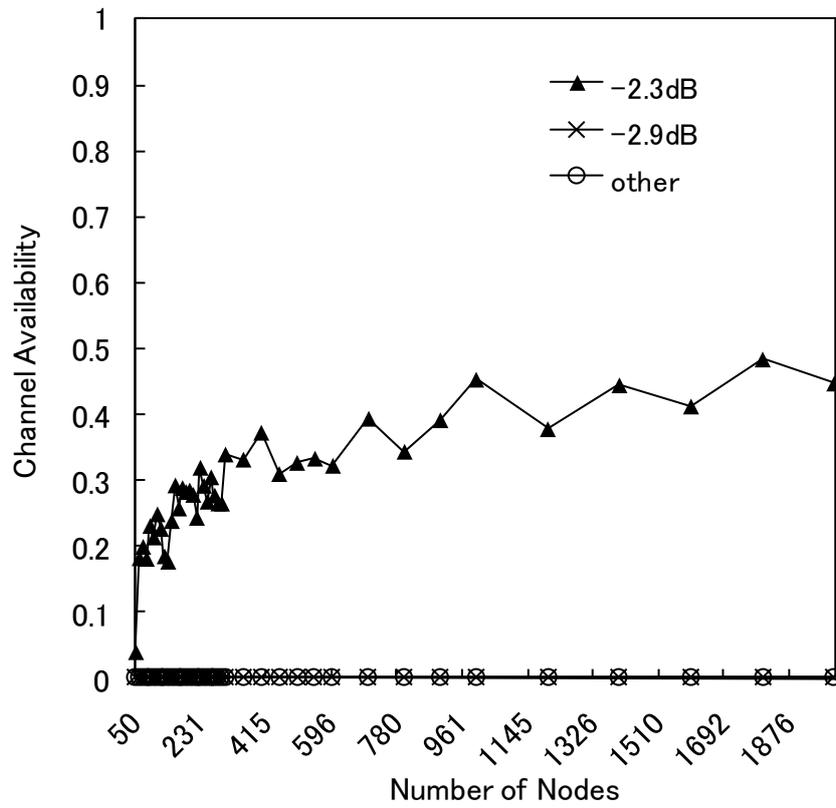


図 3-13: 1hop 時の距離別通信接続率

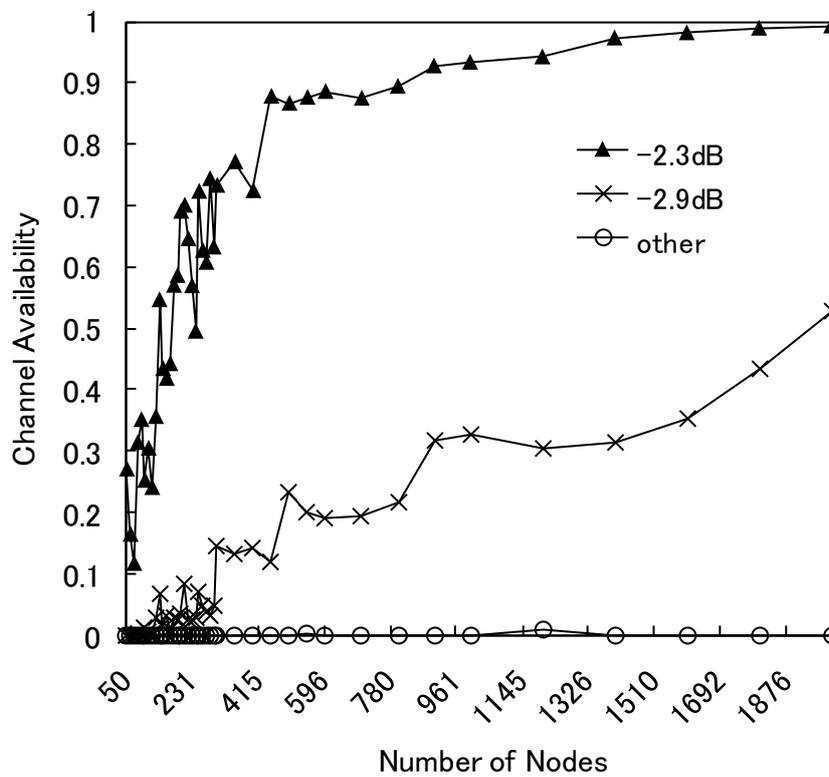


図 3-14: 2hop 時の距離別通信接続率

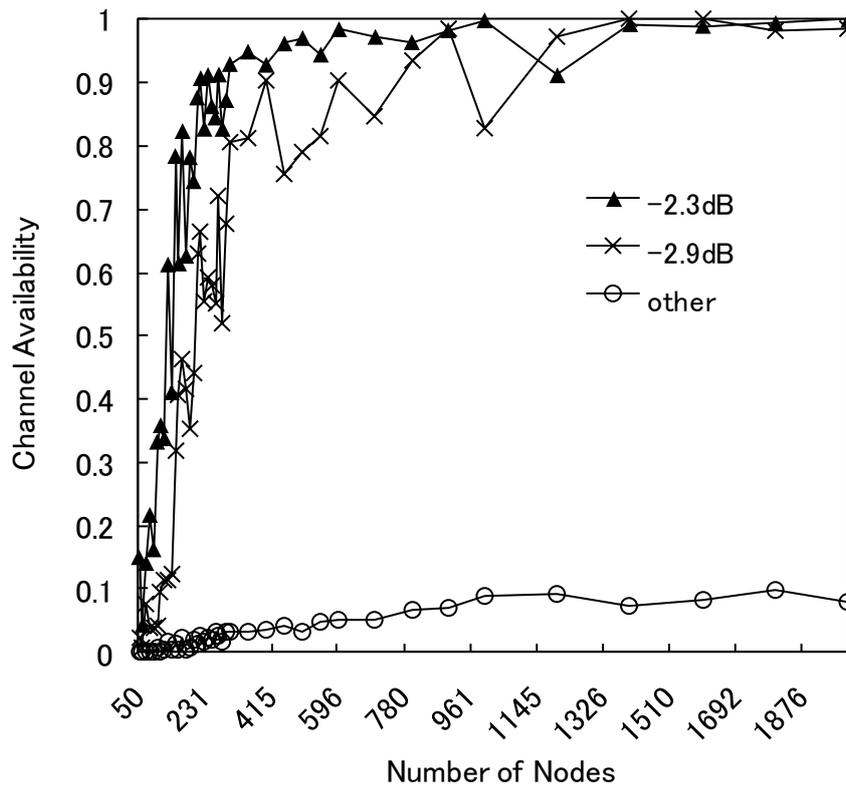


図 3-15: 3hop 時の距離別通信接続率

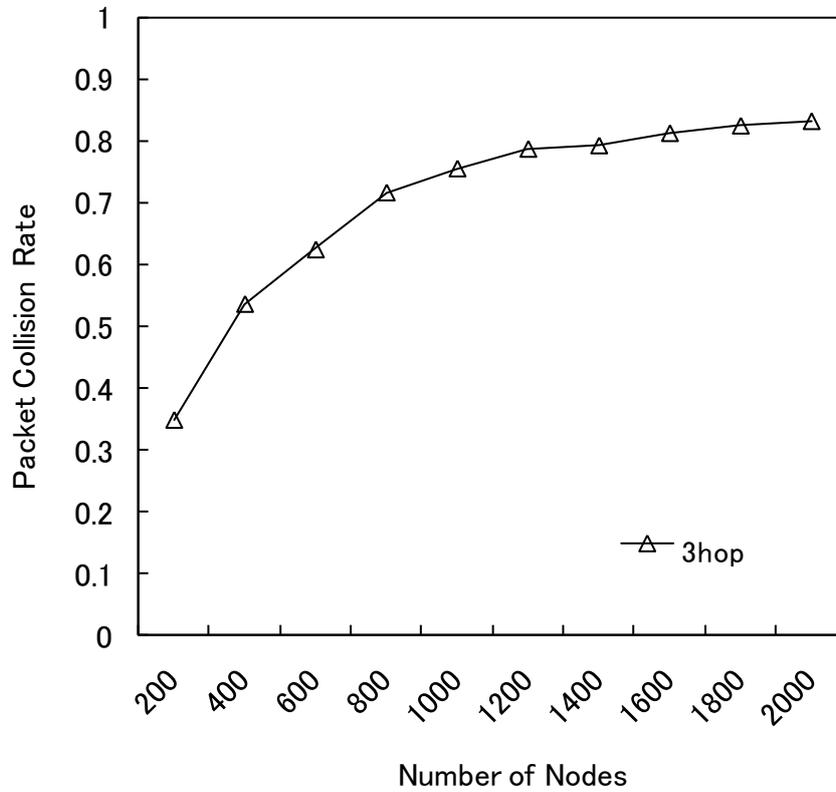


図 3-16: 3hop 時の端末数別パケット衝突率

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

次に、hop 数を 1hop から 3hop まで制限した場合の通信接続率を求めた。図 3-12 は全ての端末の hop 数別通信接続率を求めたグラフである。hop 数の上限を増やせば、通信接続率が向上することがわかる。ここで通信接続率の上昇率に焦点を当てると、1hop では約 200 端末まで 2hop では約 400 端末まで 3hop では約 1000 端末までは急激に上昇しているが、それ以上は伸びていない。つまり、端末の増加に伴い通話接続率の一時的な向上を確認できるが、hop 数に上限値があると通信接続率はいずれ収束してしまうことがわかった。

図 3-13, 図 3-14, 図 3-15 は、基地局からの受信電力レベルが -2.3dB 以上ある圏外端末から呼が発生した際の通信接続率を▲でプロットし、基地局からの受信電力レベルが -2.3dB 以下 -2.9dB 以上である端末の通信接続率を×でプロットし、基地局からの受信電力レベルが -2.9dB も満たない圏外端末の通信接続率結果を○でプロットした、基地局受信電力レベル別通信接続率を求めたグラフである。それぞれのグラフの結果から見ても、hop 数の増加により通話可能エリアの拡大が図れることが確認でき、特に×でプロットされた端末は、hop 数を増加させることで通信接続率が大幅に向上する。また端末数の増加により通信接続率はほぼ 100%満たされる。

図 3-16 は hop 数の制限を 3hop とした場合の packets 衝突率を求めたグラフである。これから、AODV 適用型モデルは端末数の増加に伴い、packets 衝突率が急激に増加してしまうことがわかる。つまり、端末数増加が必ずしもモデルの性能向上につながらないことが読み取れる。hop 数の制限を上げることは、通話接続率を向上させるために有効であると考えられるが、依頼端末数が増えることで端末の負担が増加し、最終的には packets 衝突率の増加などといった影響を引き起こす原因となる。

以上の結果から、モバイル通信へのマルチホップネットワーク適用は、基地局のカバーエリア拡大が図れるため有効であることが示された。しかし、端末数増加に伴い packets 衝突率が上昇し、ネットワークを確立するために必要なスロットを確保できなくなるおそれがあると判断される。また hop 数に上限値があると通信接続率はいずれ収束してしまい、端末数が増えることが必ずしも通信接続率を向上させるとは限らないことも明らかとなった。つまり、マルチホップネットワークをモバイル通信に適用する際に考慮することとして、端末が密の場合におけるアクセス方式の検討や制限 hop 数の上限値設定のなどといった問題が考えられる。そこで本論文では、以上のような問題を解決するため中継端末数の削減に焦点をおいたモデルの改善を図る。

3.4 基地局下り受信電力考慮モデル

圏外にある呼発生端末の近隣端末に圏内端末が複数存在する際、中継端末として最適な圏内端末を決定する方法を「基地局下り受信電力考慮モデル」として提案する。基地局下り電力考慮モデルを適用する場面としては、通信要求パケットを送信した呼発生端末が、圏内端末からの RREP を複数受信した場合に適用する。つまり 1hop 通信を対象とす

る。モデルの目的としては、基地局のカバーエリア内に数ある圏内端末を、さまざまな圏外端末の通話要求を満たす中継端末として効率的に利用することで、構築可能ネットワーク数を増加させることをねらいとする。

3.4.1 モデルの概要

図 3-17 で基地局の圏内エリアは影がかかった楕円内とし、端末 A と端末 B を中心に実線で描かれた円は各端末の通信可能エリアを示す。ここで端末 A が呼を発生した場合、端末 A は近隣端末を検索し圏内端末として端末 C、端末 D を発見できる。ここで、少し後に端末 B も呼を発生した場合、端末 B も同様に近隣端末を検索するが、もし端末 A が端末 D を中継端末として選択していると、端末 B は中継端末を発見できず通信不可能になってしまう。しかし、端末 A が端末 C を中継端末に選択していれば、端末 B は端末 D を中継端末として利用して通信できる。つまり、基地局のカバーエリアに近い圏外端末の近隣端末に圏内端末が複数ある場合、基地局により近い端末を中継端末と決定すれば、基地局のカバーエリアから離れた場所で呼を発生した圏外端末へ他の圏内端末を中継端末として譲ることができる、構築可能ネットワーク数の増加が望める。

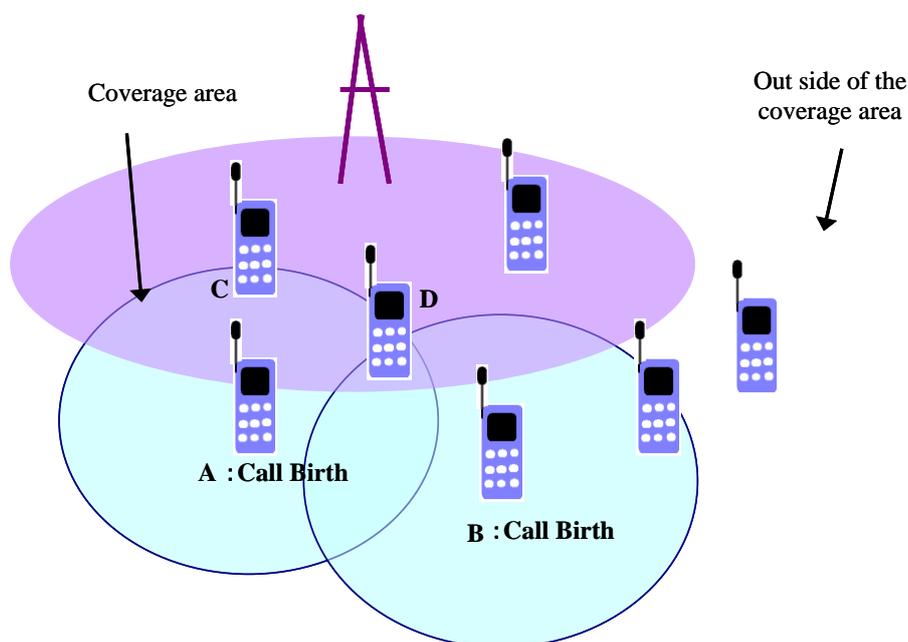


図 3-17: 圏内端末選択

次に複数の圏内端末から中継端末を決定するまでのアルゴリズムを紹介する。前提として、圏内端末は RREP に基地局からの受信電力レベル情報を付加する。複数の RREP パケットを受信した呼発生端末は、RREP に載せられた基地局受信電力レベルがある一定のレベルに最も近い端末を優先的に中継端末に選択する。以後、このある一定の基地局受信

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

電力レベルを「基地局推奨電力レベル」と呼ぶ。このモデルを計算機シミュレーションにより性能評価することで、基地局推奨電力レベルの算出を図る。

3.4.2 シミュレーション結果

呼発生端末は自端末が圏内であるならば通常通り通信を行い、圏外である場合、近隣端末から圏内端末を検索する。最大 1hop と仮定しているため、近隣端末に圏内端末が存在しない場合は通信不可能となる。圏内端末が複数端末ある場合は基地局推奨電力レベルに近い端末を優先的に中継端末として選択し通信を行う。本モデルでは、AODV 適用型モデルを基底に 3.3.2 のシミュレーション諸元によりシミュレーションを行った。評価方法としては以下の方法を用いた。

- リンク確立成功率 (Link Success Rate) = 圏外ではあるが 1hop で中継端末を介せば通話可能となるエリア内に存在する端末からの要求ネットワーク数における確立できたネットワーク数の割合

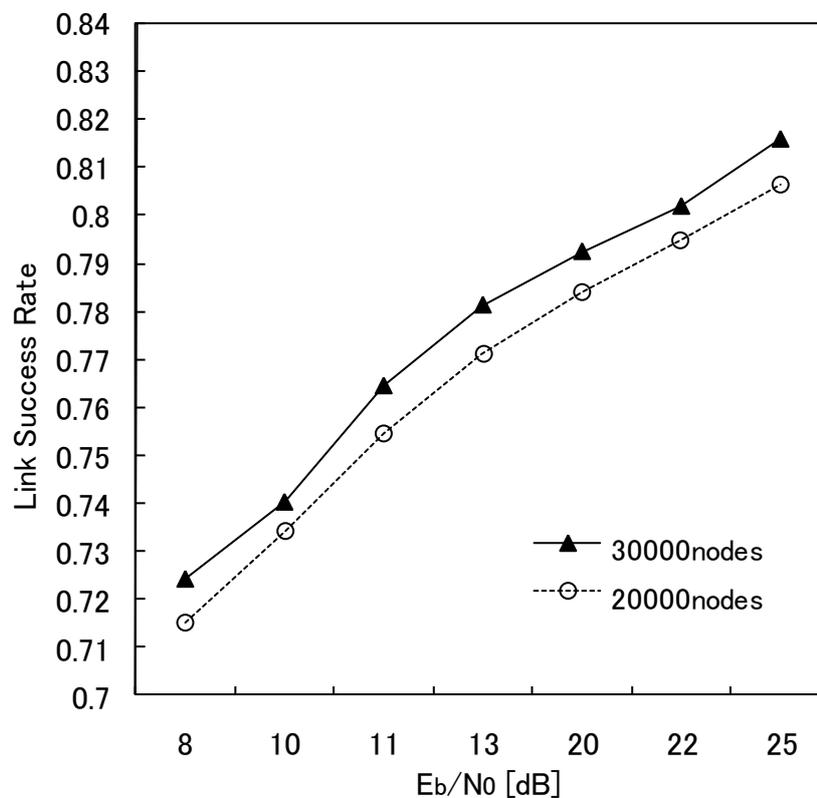


図 3-18: 基地局受信電力レベル推移リンク確立成功率

図 3-18 は端末数を 20000-30000 端末とし、基地局推奨電力レベルを 8-25dB に推移させた際のリンク確立成功率を求めたグラフである。このグラフから、基地局に近い端末を優先的に中継端末に選択することによりリンク確立成功率が向上していることが伺える。

以上の結果から、本研究で提案するモバイル通信モデルにおいて、複数の圏内端末から中継端末を選択する際、基地局受信電力レベルの最大値を基地局推奨電力レベルとすることで、ネットワーク確立要求を更に満たすことができる。つまり、本モデルを適用することにより中継端末の有効利用ができ、ネットワーク構築の性能向上が図れる。

3.5 近隣状況把握による課題解決法

AODV はフラッディングを利用しているため、通信要求パケットを受信したすべての端末が通信要求パケットをブロードキャストで転送する。そのため、近隣端末が増えるにつれ、通信要求パケットが大量に流出する。3.3.3 の結果からも、端末の増加に伴いパケットの衝突率が急増し、端末への負担が大きくなることが明らかとなった。

3.5.1 ユニキャストによる解決手段の提案

本論文では呼発生端末ないし通信要求パケットを受信した端末は、その端末の近隣端末から通信要求パケットを転送してもらいたい端末を選択し、選択した端末にユニキャストで通信要求パケットを送信する「ユニキャスト方式」を導入する。これにより、無駄な通信要求パケットの流出や端末の負担を軽減できる。ここで通信要求パケットをユニキャストするユニキャスト先となる端末のことを「転送依頼端末」と呼ぶ。ユニキャスト方式を導入し転送依頼端末を決定するには、近隣端末の状況を把握する必要がある。

現在のパケット交換型ネットワークにおいて、パケットを直接転送できず蓄積交換をする中継端末を介してパケットを転送する場合は、パケットが確実に到着したか確認をする。その方法として、パケットを受け取った中継端末が直ちに ACK (ACKnowledgement : 肯定応答) または NAK (Negative AcK : 否定応答) を返す方法が用いられている。本章では、この ACK を返すシステムを利用して近隣情報状況を把握するモデルを提案する。

3.5.2 近隣状況把握パケットの構成とチャネルの割り当て

呼発生端末ないし通信要求パケットを受信した端末は、3.2.2 で示した通信要求パケットの代わりに、以下の情報が示されたパケットを近隣端末にブロードキャストする。

- ◆ 近隣状況把握パケットであることの識別
- ◆ 自端末の ID
- ◆ 呼発生端末の ID

本論文では、このパケットを「近隣状況把握パケット」と呼ぶ。近隣状況把握パケット

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

を受信した端末は、3.5.1で紹介したACKシステムを利用して、パケット送信元の端末に向けて自端末の情報を載せたACKを返信する。近隣状況把握パケットとACKの情報量は通信要求パケットの情報量に比べごく少ないこととして、通信要求パケットを送信する1slot内でこの作業を行う。具体的には図3-19のように1slotをMini_Slot分割して、最初のMini_Slotに近隣状況把握パケットを送信し、受信した近隣端末は残りのMini_Slot内からランダムにACK送信タイミングを決定しACKを返信する。ただし近隣状況把握パケットやACKの衝突により、情報を正確に受信できない恐れがある。ここで、3.3.3の考察から制御パケットは3から5回程度なら再送してもパケット衝突率の増加に影響はない結果を考慮し、ユニキャスト方式でも近隣状況把握パケットは3回送信する。

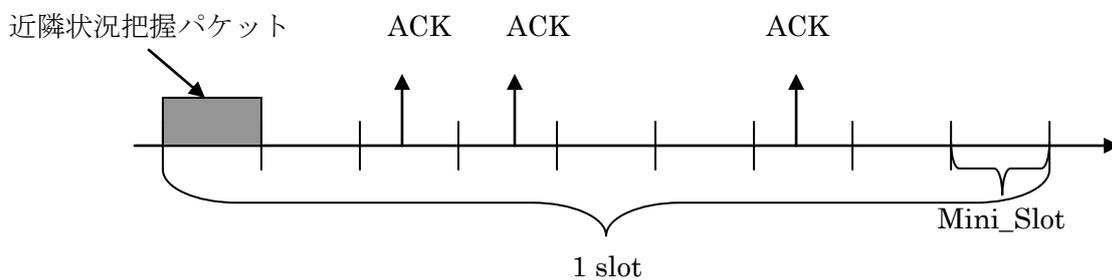


図 3-19: 近隣状況把握パケットと ACK の送信スロット

3.5.3 最適依頼端末選択方法の考察

近隣状況把握パケットとACKのやり取りにより、近隣端末の状況を正確に把握した後、その近隣端末から最適な転送依頼端末を決定する必要がある。ここで最適な転送依頼端末について考察する。

図3-20の端末Rを呼発生端末と仮定した場合、最適な転送依頼端末を選択する方法について検討する。まず、端末A、B、C、Dを転送依頼端末とすると各端末は密集した範囲内にあるため、パケット衝突が起こる可能性が高くなる。このように端末が密集しているエリアにおいてはその中の限られた端末のみが転送依頼端末となればよい。次に、端末Rに近い端末Gを転送依頼端末としても、端末Rの通信可能エリア内にある端末D、E、Fが転送依頼端末となっていると、各端末に重複して通信要求パケットを転送することとなりスループットの低下を招きかねない。逆に呼発生端末から遠すぎてもマルチホップネットワーク構築時の経路保持に対する信頼という面で効率が悪い。したがって、このような端末への転送依頼は避け、中継端末としてマルチホップネットワークを構築することも踏まえて矢印で表したように適度に離れた端末を転送依頼端末とした方がよいと推測される。また、圏内エリアから離れている端末E、Fを依頼端末とするより端末I、Hのような基地局のカバーエリアに近い端末に依頼をすることで、圏内端末の早期発見が期待できると考えられる。つまり、最適な依頼端末は以下の条件を満たす端末であると推測される。

- i) 呼発生端末ないし転送依頼端末から適度に離れている
- ii) 360° すべての方向に向けて通信要求パケットを転送するため、転送依頼端末同士適度に離れあっている
- iii) 基地局に近いと思われる

そこで本論文では、i)とii)を考慮したネットワーク構築モデルとして「バーチャルマップモデル」を、iii)を考慮したものとして「圏外経過時間考慮モデル」を提案する。近隣端末に圏内の端末が存在すれば、この端末を中継端末として通信を行うので、近隣端末に圏内の端末がないことを前提として検討を進める。

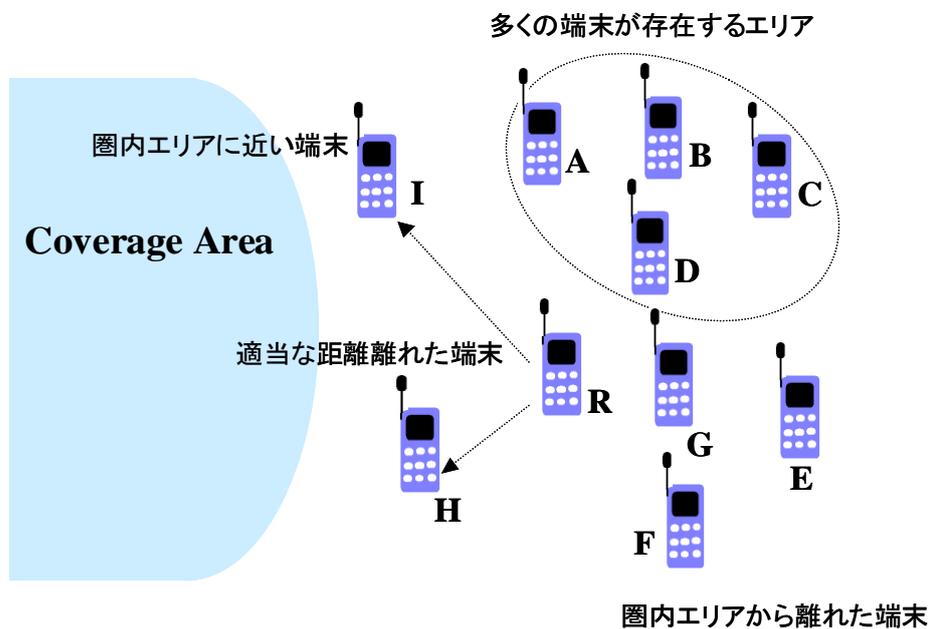


図 3-20: 最適な依頼端末の考察

3.6 むすび

マルチホップネットワークをモバイル通信へ適用した際のルーチング方法やアクセス方式について提案した。まず、マルチホップネットワークを適用する際にフラッディングを用いた既存のAODVを導入したAODV適用型モデルを評価した。その結果、hop数の制限を増やすことで基地局のカバーエリアの拡大が図れるが、端末の増加に伴いパケット衝突が頻繁に起きてしまうことも確認した。また通信要求パケットの送信回数についても考察した結果、ネットワーク構築効率の向上のため、本モデルでは制御パケットの送信回数を3回にすることが有効であることを示した。

第3章 ブロードキャストを用いたマルチホップモバイル通信方式

また、圏外にある呼発生端末の近隣端末に圏内端末が複数端末ある際の、圏内端末選択方法として基地局下り電力考慮モデルを提案し評価した。その結果、基地局下り電力の大きい端末を優先的に中継端末として選択することで、より多くの通信要求を満たすことができることを示した。

次にブロードキャストする通信要求パケットをユニキャストにて送信する方法としてユニキャスト方式を提案した。これは、近隣状況把握パケットと ACK のやり取りにより近隣端末の情報を得て、転送依頼端末に通信要求パケットをユニキャスト送信する方式である。近隣端末から最適な転送依頼端末を選択する提案方法として、バーチャルマップモデルと圏外経過時間考慮モデルを紹介した。次章でそれぞれのモデルのアルゴリズムを紹介し、AODV 適用型モデルとの比較評価を行う。

第4章

バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式

4.1 まえがき

モバイル通信にマルチホップネットワークを適用することで基地局のカバーエリア拡大が図れることを第3章で証明したが、制御パケットをフラッディングすることで、パケットの衝突が頻繁に生じることも明らかとなった。そこでユニキャスト方式を導入し、ユニキャスト先となる転送依頼端末を選択する方法としてバーチャルマップモデルを提案する。

4.2 バーチャルマップモデル

転送依頼端末を選択する際に考慮することとして、圏内エリアがどこに存在する分らないため、 360° すべての方向へ通信要求パケットを転送できるように端末を選択したい。また 3.5.3 でも言及したように、転送依頼端末は中継端末となる可能性があるため、マルチホップネットワークを構築した後の QoS 向上も図れるよう、適度な距離だけ離れている必要がある。もし単純に端末同士の位置が既知であれば容易に実現できるが、現状では端末同士の位置を正確に把握することは困難である。ただし、近隣端末と無線通信を行えば、端末間の受信電力レベルは知ることができる。この受信電力レベルを距離のパラメータとして置き換えることで、端末同士の相対的な位置認識は可能となる。そこでまず、自端末と近隣端末や近隣端末同士が通信を行う際に得られる受信電力レベルをもとにバーチャルマップを作成する。次に、近いと思われる端末同士をグループ化するグルーピングという概念を導入し、転送依頼端末を決定するアルゴリズムを「バーチャルマップモデル」として提案する。

4.2.1 モデルの概要

バーチャルマップモデルはユニキャスト方式であるため、まず呼発生端末ないし転送依頼端末は近隣状況把握パケットと ACK のやり取りを 3 回行う。近隣端末からの ACK を受

第4章 バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式

信すればその受信電力レベルを距離のパラメータとすることで近隣端末間の距離を知ることができる。この際、近隣端末は Mini_Slot 内で ACK を送信するが、自端末が送信していない時は自端末の近隣端末の ACK も受信することができる。近隣状況把握 packets は 3 回送信されるので、2 度目以降の ACK 返信時に他端末の ACK 受信電力レベル情報も載せることで、呼発生端末ないし転送依頼端末は、近隣端末とその近隣端末同士の距離も推測することができる。

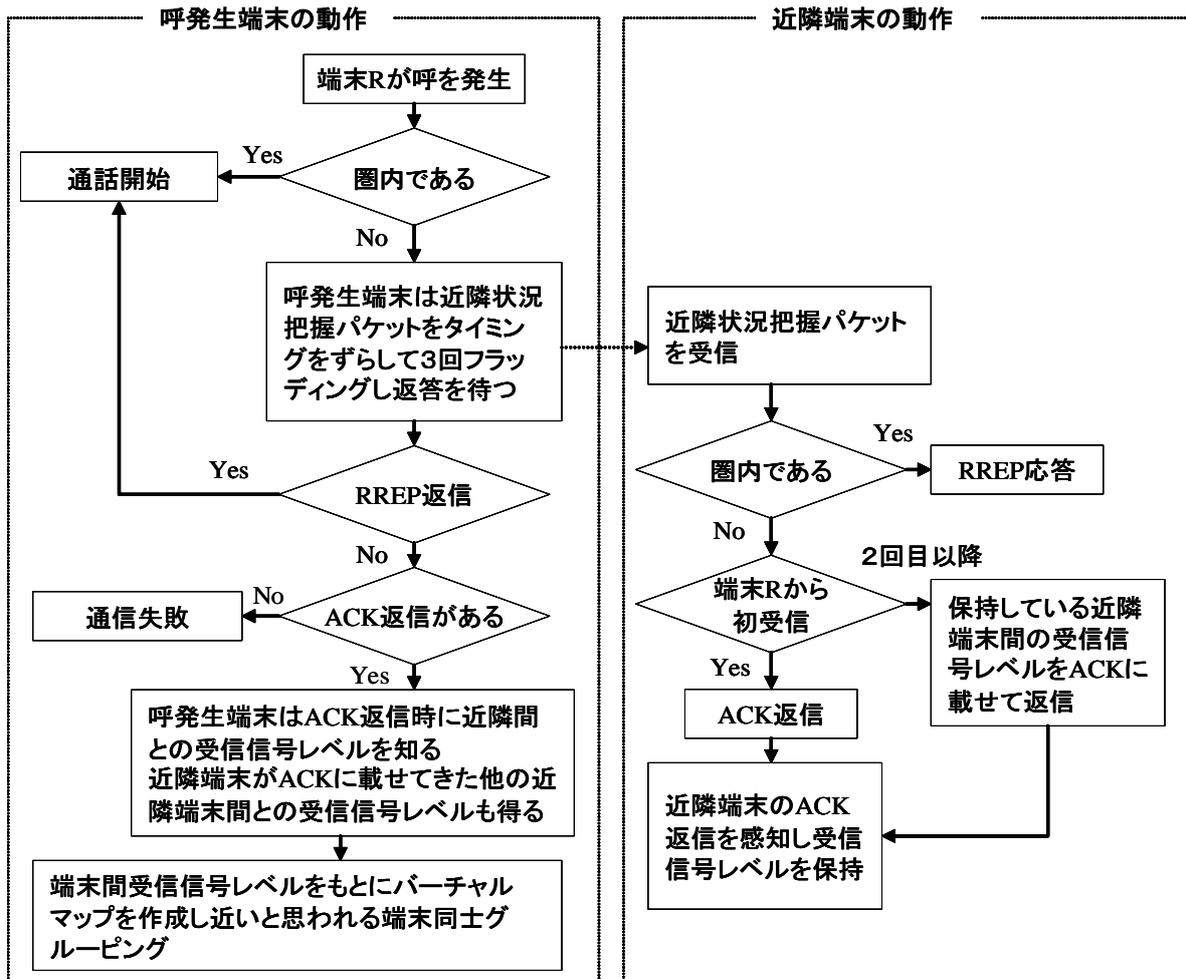


図 4-1: グルーピングまでのフローチャート

この距離の情報をもとにバーチャルマップ作成して、近くにあると推測される近隣端末同士をグルーピングし、そのグループの中から 1 端末を転送依頼端末として選択して通信要求パケットをユニキャスト送信する。通信要求パケットを受信した端末も、呼発生端末同様に、バーチャルマップを作成してグルーピングし転送依頼端末を選択して通信要求パケットをユニキャスト送信する。これを圈内端末が見つかるまで繰り返す。もし、呼発生端末ないし転送依頼端末が近隣状況把握パケットを送信し、これを圈内端末が受信すれば

AODV 適用型モデルと同様に，圈内端末は RREP を呼発生端末にむけて逆順路をたどって送信することでネットワークを確立する．図 4-1 はバーチャルマップモデルの情報収集アルゴリズムについて簡単にフローチャート化した図である．

4.2.2 バーチャルマップ作成

呼発生端末や転送依頼端末がバーチャルマップを作成するまでの具体的なアルゴリズムを紹介する．図 4-2 のように圏外端末がランダムに存在しているとし，端末 R が呼発生端末ないし通信要求パケットの転送依頼端末であると仮定する．円内は端末 R との通信可能エリアである．

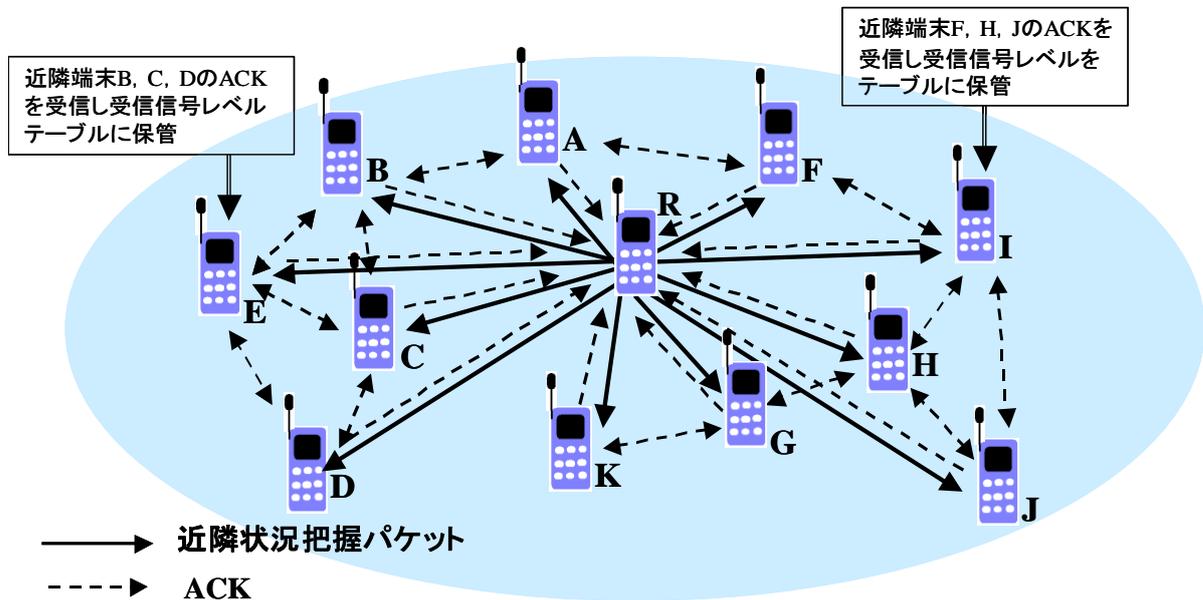


図 4-2: 近隣状況把握パケットと ACK 受信時の動作

端末 R は近隣端末の情報を収集するため近隣状況把握パケットを図 4-2 の矢印で示すようにブロードキャストする．近隣状況把握パケットを受け取った近隣端末は，自端末の存在を示す ACK を図 4-2 の点線の矢印で示すように返信する．ここで近隣端末は他にも ACK を返信している近隣端末の ACK を図 4-2 の点線の両矢印で示すように受信できる．例えば端末 E は端末 B, C, D が近隣にあり，また端末 I は端末 F, H, J が近隣にあるため，端末 E, I はそれぞれが ACK を返信していない際に，他の近隣端末が送信した ACK を監視し近隣端末の存在を察知することができる．端末 R の近隣端末は ACK により感知した他の近隣端末からの受信電力レベルをルーチングテーブルに保管しておく．例えば，端末 E, H のルーチングテーブルは図 4-3 に示すようになる．端末 R は近隣状況を正確に把握するため近隣状況把握パケットを 3 回送信するので，近隣端末は 2 回目以降の ACK

第4章 バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式

にこのルーチングテーブル情報を付加して返信する．これにより端末 R は自端末と近隣端末間，また近隣端末間同士の受信電力レベルを認識することが可能となる．性能評価の際には，近隣状況把握パケットとそれに対する各 ACK は Mini_Slot 内で衝突するものとして評価を行っている．ここで，近隣状況把握パケット，ACK ともランダム送出に基づいているため衝突する可能性がある．ただし，近隣状況把握パケット再送ごとに ACK を返信しているので，情報収集に関する信頼性は向上していると考えられる．

端末 E のテーブル	
端末 B の ID	$P_{e,b}$
端末 C の ID	$P_{e,c}$
端末 D の ID	$P_{e,d}$

端末 H のテーブル	
端末 I の ID	$P_{h,i}$
端末 J の ID	$P_{h,j}$
端末 G の ID	$P_{h,g}$

- ◆ $P_{x,y}$ は，端末 X が受信した端末 Y からの ACK 受信電力レベル[W]

図 4-3: 端末 E, H のルーチングテーブル

端末 R はこのようにして集めた情報をもとに距離を推定する．ここで，受信電力レベルと距離は反比例の関係にあるため，受信電力レベルを P とするとその距離 L は

$$L[m] = a \frac{1}{P} [W] \quad (4-1)$$

で表される．ここで a は定数であり，本論文では簡単のため $a=1$ として計算を行っている．以後このような関係を

$$L \cong P \quad \cong \quad : \text{電力 } P \text{ を距離 } L \text{ へ近似する変換}$$

と表現する．

例えば，端末 E のテーブル情報からは

$$\left\{ \begin{array}{l} L'_{e,b} \cong P_{e,b} \\ L'_{e,c} \cong P_{e,c} \\ L'_{e,d} \cong P_{e,d} \end{array} \right. \quad (4-2)$$

が得られる．しかし，これは端末 E が受信した電力レベルのみから導かれた式なので，逆の端末 B, C, D が受信した電力も考慮し，最終的に

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{b,e} \cong \frac{1}{2} (P_{b,e} + P_{e,b}) \\ L_{c,e} \cong \frac{1}{2} (P_{c,e} + P_{e,c}) \\ L_{d,e} \cong \frac{1}{2} (P_{d,e} + P_{e,d}) \end{array} \right. \quad (4-3)$$

が導かれる。また、端末 E と端末 H はそれぞれの通信可能距離内にないため、距離を決定できない、そこで、この場合は距離が十分離れているとして、受信信号電力の最小値 $P_{\min i}$ を利用して最大距離を導き、この値を代入する。本論文では、信号の最小レベルは E_b / N_0 であるので、端末間最大距離 L_{\max} は

$$L_{\max} \cong P_{\min i} = 10 \exp\left(\frac{E_b / N_0}{10}\right) \quad (4-4)$$

とする。以上により各端末間の距離を推定し、ある一定距離以内にある端末同士を 1 つの集合としてグループ化する。

近隣端末から収集した情報から、バーチャルマップを図 4-4 のように作成する。端末間の矢印は受信電力レベルから求めた距離のパラメータである。近いと思われる近隣端末を点円で囲むようにグループ化し、同グループ内から 1 端末ずつ転送依頼端末を決定すれば、 360° すべての方向への通話要求パケット転送が可能となる。

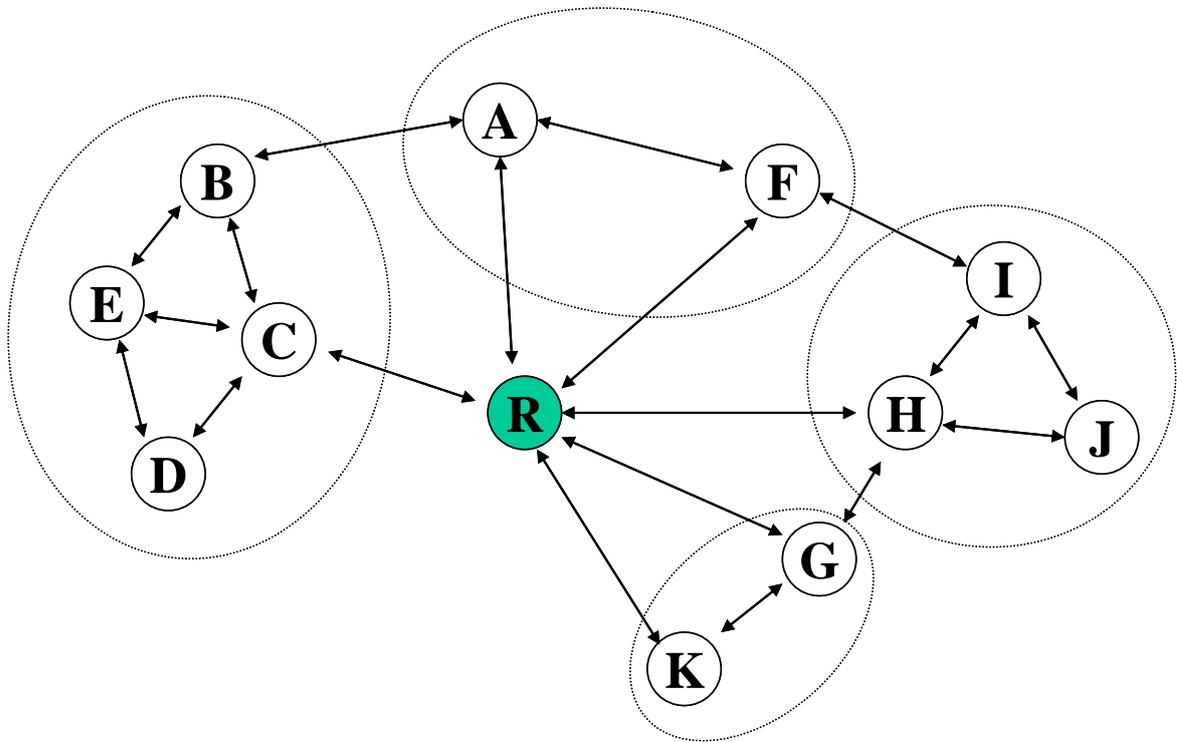


図 4-4: バーチャルマップ

4.2.3 転送依頼端末決定方法

次に作成されたバーチャルマップから任意のグループ数になるようにグループ分けをして、転送依頼端末を選択するまでのアルゴリズムについて説明する。グルーピングは以下の手順に従う。

- i) バーチャルマップから自端末-近隣端末間と、近隣端末同士間の距離を得る。ここで、近隣端末は上下リンクの違いから同一経路であったとしても異なった値の受信電力レベル情報を送信してくることが予想されるが、同一経路における端末間距離は受信電力レベルを平均化して距離に変換する。
- ii) 端末間距離のしきい値として一定距離 l_0 を設定し、設定値以内の距離を保持している端末同士を1グループとしてグルーピングする。
- iii) 希望グループ数を超える場合はしきい値の値を上げ、下回る場合は値を下げる。
- iv) 希望グループ数に近づくまでiiiを繰り返す。

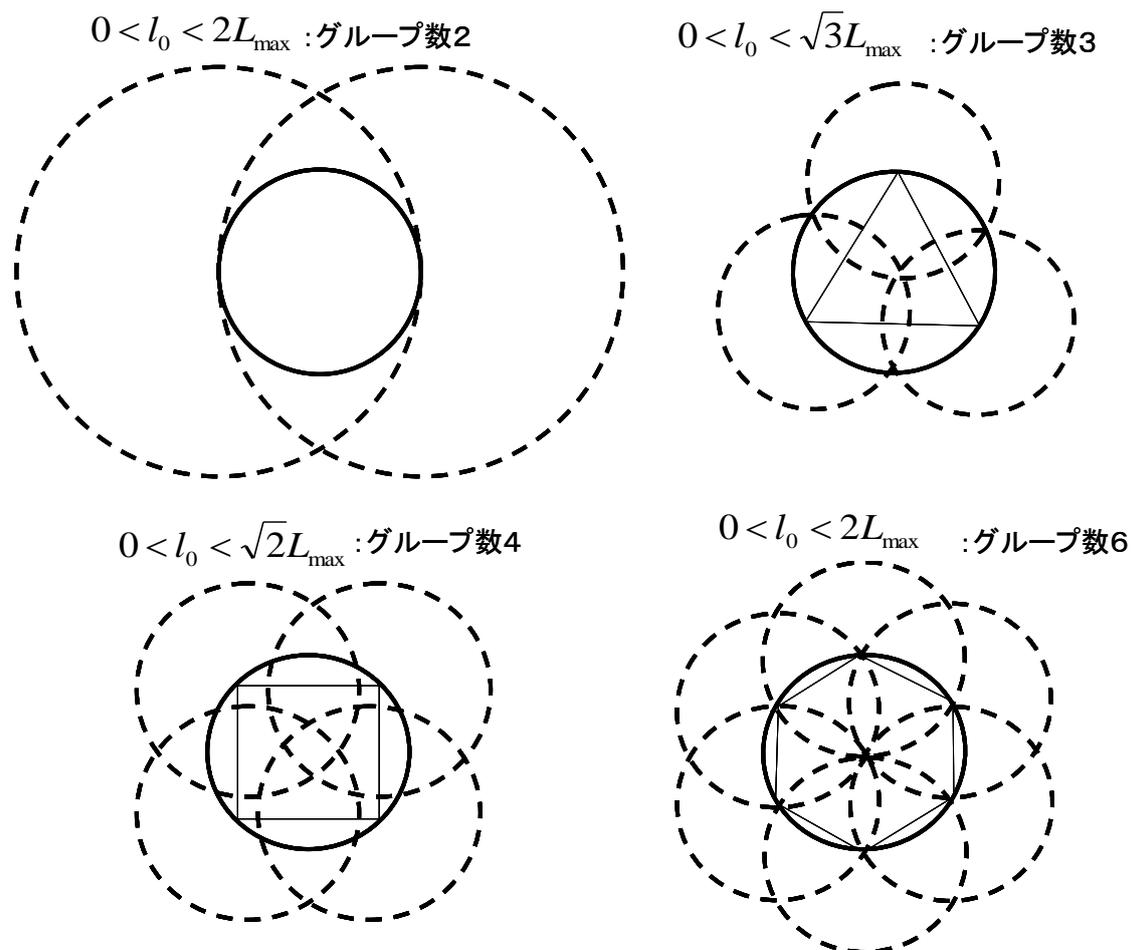


図 4-5: グループ数と距離の関係

第4章 バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式

以上から、グループ分けをする際は、まずは最大距離と最小距離を分けたいグループ数の値から求めて、その中間値で近隣端末同士のグルーピングを行う。もし分けたいグループ数にならなかった場合は、最大距離と最小距離の値を適宜変化させることで、再度グルーピングを行う。これをグループ数が4になるまで繰り返す。グループ数が4となった場合に、グルーピングが完了する。

次にグループの中から、転送依頼端末を1端末選択するまでの具体的なアルゴリズムを説明する。図4-7はある呼発生端末ないし転送依頼端末が作成したバーチャルマップである。●が呼発生端末、○が近隣端末である。グルーピングアルゴリズムを用いて、ある一定距離以内に存在しあう端末同士を1つのグループとして図4-7の実線の円で囲むようにグルーピングされている場合を検討する。

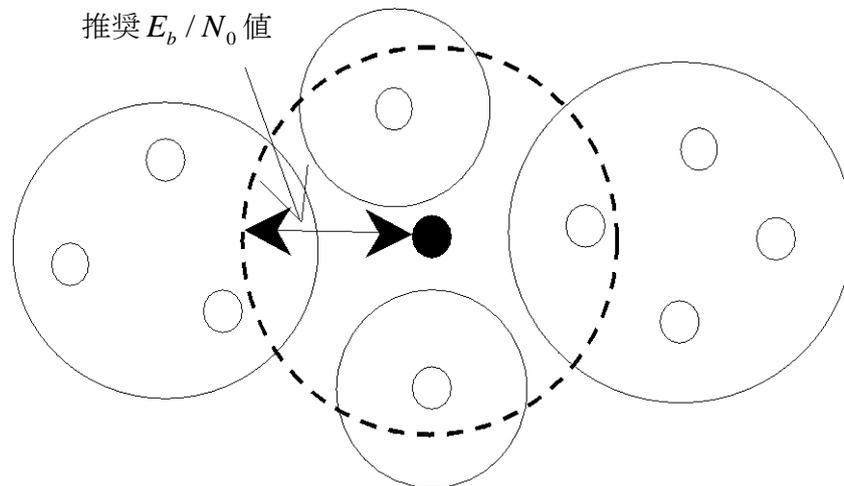


図 4-7: バーチャルマップを用いた転送依頼端末決定方法

図4-7の場合のグループ数は4グループとなる。同グループ内から1端末ずつ転送依頼端末を決定すれば、 360° すべての方向への通信要求パケット転送が可能となる。同時に、端末が密集したエリアにおけるパケット衝突も削減できる。同グループ内端末から転送依頼端末として選択するには、3.5.3でも述べたように、呼発生端末ないし転送依頼端末から適度な距離だけ離れている端末を選択することが望ましい。よって、呼発生端末ないし転送依頼端末(図4-7の黒●)を中心に、任意の受信電力レベル E_b / N_0 を半径とする円(図4-7の点円)を描き、この円により近い近隣端末を転送依頼端末として選択する。これにより、呼発生端末ないし転送依頼端末から適度な距離だけ離れている近隣端末を転送依頼端末として選択することができる。以後、図4-7の点円の半径を「推奨 E_b / N_0 値」と呼ぶ。バーチャルマップモデルを用いて圏外端末が基地局とのネットワークを構築した際に、

QoS が優れるような中継端末を選択できるような有効的な推奨 E_b/N_0 値をシミュレーションにより算出する。

本提案モデルでは、呼発生端末ないし転送依頼端末が転送依頼端末を選択する方法として、バーチャルマップを作成しグルーピングを行い推奨 E_b/N_0 値で囲まれた円に近い端末を選択する方法をバーチャルマップモデルとして提案する。本提案方式は転送依頼端末を選択したのち、通常ブロードキャストする通信要求パケットをユニキャストする方式をとるが、それ以外の通信モデルに関しては、AODV 適用型モデルを基底としている。推奨 E_b/N_0 値は次節にて算出する。

4.3 シミュレーション評価

バーチャルマップモデルを計算機シミュレーションにより性能評価を行う。まず、近隣状況把握パケットの送信回数について適切な回数の算出を図る。また、バーチャルマップによりグルーピングされた端末から転送依頼端末を選択する際に用いる推奨 E_b/N_0 値の算出を行う。最終的には、AODV 適用型モデルと性能比較を行い、バーチャルマップモデルの特性を示す。

4.3.1 シミュレーション諸元

表 3-1 に示すパラメータをベースにしてシミュレーションを行う。端末はフィールド内にランダム配置され、8 方向をランダムに選択し、その方向に向けて一定の速度で移動するが、シミュレーションフィールドから外れた場合は 180° 方向を変えることで、必ずフィールド内を移動する。基地局はシミュレーションフィールド内に 1 端末とする。圏外端末が圏内端末を発見できず基地局までのルートが構築できない場合は、通常通り通信不可能とする。呼発生端末は呼発生率からポワソン分布で発呼し、平均通話時間の指数分布を利用することで通話時間を求める。ここで、本章で考慮する伝搬損失モデルとして、基地局と端末間通信に池上モデルを、端末同士の通信に平面大地伝搬モデルを適用している。複数の端末が発する受信可能なパケットが同タイミングで到着する場合、パケット衝突とみなす。

第4章 バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式

表 4-1: シミュレーションパラメータ

フィールド	1000 [m] × 1000 [m]
端末の移動速度	4 [km / h]
端末の移動方向	8 方向—ランダム決定
基地局の位置	(500 [m] , 500 [m])
周波数帯域幅	25 [kHz]
シミュレーション時間	端末数にあわせて変動
Slot 間隔	0.01 [sec]
Mini_Slot	0.1 [slot]
基地局-端末間通信方式	PDC 方式
端末間通信方式	1 本の通話要求チャンネル 十分な通話チャンネル TDMA 方式
平均通話時間	180 [sec]
呼発生率	0.00000065
所要 E_b / N_0	3 [dB]
伝搬損失	< 基地局—端末間 > 池上モデル < 端末間 > 平面大地伝搬モデル
基地局電力	1000 [mW]
端末電力	100 [mW]
パケット有効期限	5 [sec]
パケット送信回数	1-3 回
Hop 数	1-8hop
端末数	200-2000

4.3.2 近隣状況把握パケット送信回数の検証

近隣情報把握パケットを数回送信することでバーチャルマップを作成することを前提としているが、送信回数には制限を設ける必要がある。ここで、近隣状況把握パケットを数回送信する意図を以下に述べる。AODV 適用型モデルは呼発生端末が近隣端末に向けて通信要求パケットをブロードキャストし、受け取った近隣端末は転送するために通信要求パ

第4章 バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式

ケットをブロードキャストするモデルである。バーチャルマップモデルは呼発生端末が近隣状況把握パケットをブロードキャストし、これを受け取った近隣端末は ACK を返信するモデルである。ただし、ACK もブロードキャストしているだけなので AODV 適用型モデルと比較し、ここまでの動作としてはほぼ同等である。しかし、バーチャルマップモデルはユニキャスト方式であるため、転送依頼端末に通信要求パケットをユニキャストした後、その転送依頼端末は近隣状況把握パケットをブロードキャストし近隣端末が ACK 返信しなければならない。よって、AODV 適用型モデルと比べると全体を通して、この操作分の負荷が増える。ただし、近隣状況把握パケットと ACK は情報量の微小なパケットであり、Mini_Slot を利用する前提であるため、これらのパケットが衝突する確率は極めて少ないと考えられる。最終的に AODV 適用型モデルでブロードキャストされる通信要求パケットの数は、バーチャルマップモデルでユニキャストされる通信要求パケットに比べて多いことは明らかである。また、送信回数制限の増加がパケット衝突に与える影響は AODV 適用型モデルの方が更に受けやすいと考えられる。したがって、バーチャルマップモデルにおいて近隣状況把握パケットの送信制限を増加させても通信要求パケット転送端末の削減ができていたため、パケット衝突への影響は軽いと考えられ、3 章の結果導入し近隣状況把握パケットを数回送信することは意義があるといえる。パケットの衝突を避けることを前提として、本モデルを評価するため、通信要求パケットをユニキャストする依頼端末数を 4 端末、パケットの有効期限を 200slot、hop 数の制限を 3hop としてシミュレーションを行った。評価方法としては制御チャンネル上での制御パケットの影響について性能を評価する指標として以下の方法を用いた。

- パケット送信成功率 (Packet Success Rate) = 総送信制御パケット数あたりの正確に届いたパケット数の割合
- パケット衝突率 (Packet Collision Rate) = 制御パケットが送信された総スロット数あたりのパケット衝突が起きたスロット数の割合

図 4-8 から、パケット送信制限を 1 回から 3 回と増やせば端末の増加に伴い成功率が向上することが明らかとなった。また図 4-9 から、パケット衝突率は送信制限によらず増加することがわかる。つまり、AODV 適用型モデルと同様にパケット送信成功率向上のために近隣状況把握パケットを数回送信することが有意義であることが示された。本モデルでも制御パケットである近隣状況把握パケットの送信回数は 3 回として検討する。

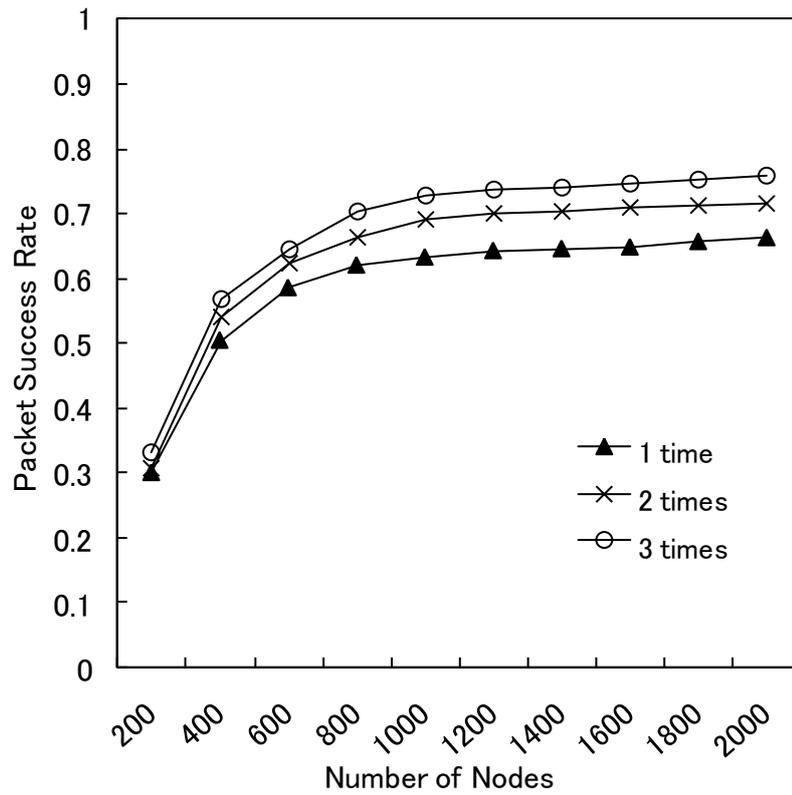


図 4-8: 送信制限回数別制御パケット送信成功率

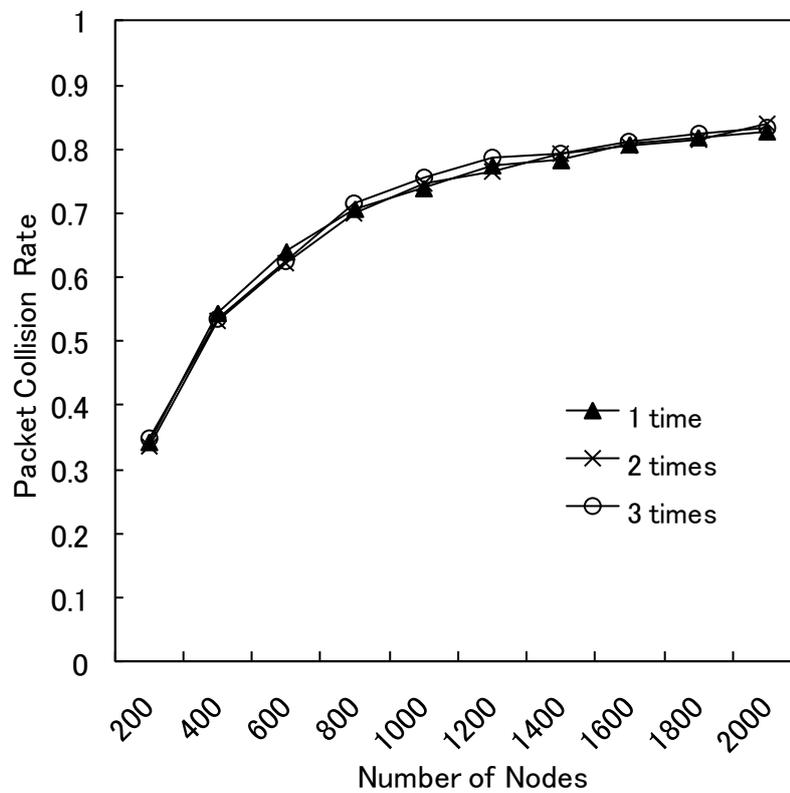


図 4-9: 送信制限回数別制御パケット衝突率

4.3.3 端末間受信電力による推奨 E_b/N_0 の算出

バーチャルマップモデルでは、呼発生端末ないし転送依頼端末はバーチャルマップを作成しルーピングを行い受信電力レベルが推奨 E_b/N_0 値に近い端末を通信要求パケットの転送依頼端末として選択する。この推奨 E_b/N_0 値を算出するため、受信電力レベルを任意に設定した E_b/N_0 に近い端末を優先的に転送依頼端末として選択する制御のもと、シミュレーションを行った。

ここで用いられる制御モデルによるネットワーク構築までの具体的なアルゴリズムを説明する。まず呼発生端末ないし転送依頼端末は、近隣端末の E_b/N_0 を知るため全近隣端末から仮に信号を送信してもらう。その受信電力レベル E_b/N_0 が推奨 E_b/N_0 値に近い複数端末を転送依頼端末に選択して、通信要求パケットをユニキャストする。これにより作成された複数ルートから、推奨 E_b/N_0 に最も近い端末により構成されているルートを選択することでネットワーク構築を行った。

通話中のネットワークの状態について、経路確認インターバル値を設定し、経路確認インターバルに1回、基地局-圏外端末間ネットワークが切断されていないかチェックする。ここでは経路確認インターバル=1secとしている。評価方法として以下の方法を用いた。

- 平均接続スロット数 (Available Slots) = マルチホップでリンクが確立したネットワークが端末の移動により切断されるまでの接続できたスロット数の平均値

図 4-10 は端末数を 1000 端末、hop 数の制限を 4hop、送信制限を 3 回、最大転送依頼端末数を 5 端末とした際の平均接続スロット数をグラフ化したものである。リンクを確立できたネットワークの状態について、通話ができているか接続確認を行うことで、このリンクの有効性を評価し、推奨 E_b/N_0 値の存在について検証した。

図 4-10 より、受信電力レベル E_b/N_0 が約 15dB から 19dB に近い端末を優先的に転送依頼端末に選択した場合、平均接続スロット数が最大になることがわかる。つまり本シミュレーションモデルにおいては、推奨 E_b/N_0 値を約 15dB から 19dB とし、近隣端末の受信電力レベルがこの値に近い端末を転送依頼端末として優先的に選択することで、ネットワークの接続時間を最も長くすることができ、効率が良いことが示された。本論文で算出した推奨 E_b/N_0 値は、端末数を 1000 端末として本シミュレーションパラメータで評価したもので、条件が変われば推奨 E_b/N_0 値も異なる値を持つものと思われる。ただし、今回は推奨 E_b/N_0 値の存在が確認できたとして、ここで得られた結果を以降の転送依頼端末選択時に使用する。

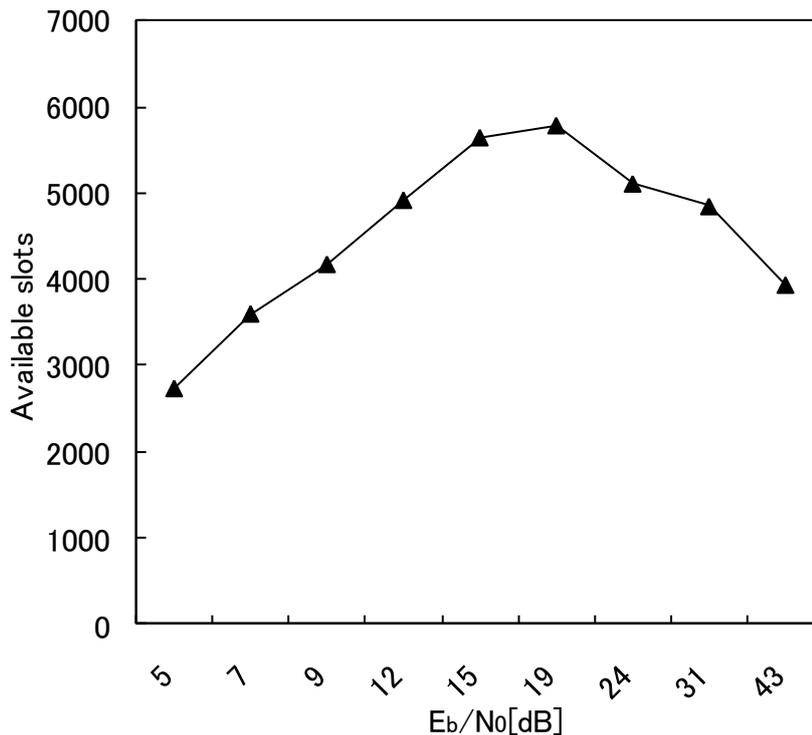


図 4-10: 推奨 E_b/N_0 値の算出

4.3.4 シミュレーション結果及び比較評価

バーチャルマップモデルでは、性能評価基準としてマルチホップネットワークの問題点であるパケット衝突の回避と、制御パケット増加の軽減を念頭におき、計算機シミュレーションにより AODV 適用型モデルと比較評価する。性能評価をするにあたり、バーチャルマップモデルでユニキャストされる通信要求パケットと、ブロードキャストされる近隣状況把握パケットや ACK も評価の対象となっている。

評価方法としては以下の方法を用いた。

- パケット送信成功率 (Packet Success Rate) = 総送信制御パケット数あたりの正確に届いたパケット数の割合
- パケット衝突率 (Packet Collision Rate) = 制御パケットが送信された総スロット数あたりのパケット衝突が起きたスロット数の割合
- ルート構築率 (Route Establishment Rate) = 圏外端末が呼を発生して圏内端末とのルートを構築する際の、ルート構築要求数あたりの圏内端末が見つかりルートを構築できた数の割合
- 通信接続率 (Channel Availability) = 希望通話時間あたりの成功通話時間の割合
- 制御パケットの総数 (All Packets) = 通信要求パケットと近隣状況把握パケットの総数の平均値

第4章 バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式

まずは、バーチャルマップモデルを採用する際に適していると考えられるグループ数、つまり転送依頼端末数について検討する。また本論文の目的は、モバイル通信へのマルチホップネットワーク適用による基地局のカバーエリア拡大である。よって、RREQ等の制御パケットを必要な端末に送信し、最終的に圏内端末と圏外端末間のルートを発見する必要がある。ただし、バーチャルマップモデルは中継端末を制限しているため、ルートを構築できる割合が減少してしまうおそれがある。そこで、ルート構築率を求めることでその性能について検討し、AODV型モデルとの比較を行った。更に、制御パケットとしては、近隣状況把握パケットとそれに対するACKは1スロットの内で処理されると仮定し、ACKを含めた近隣状況把握パケットを1つの制御パケットとして換算している。

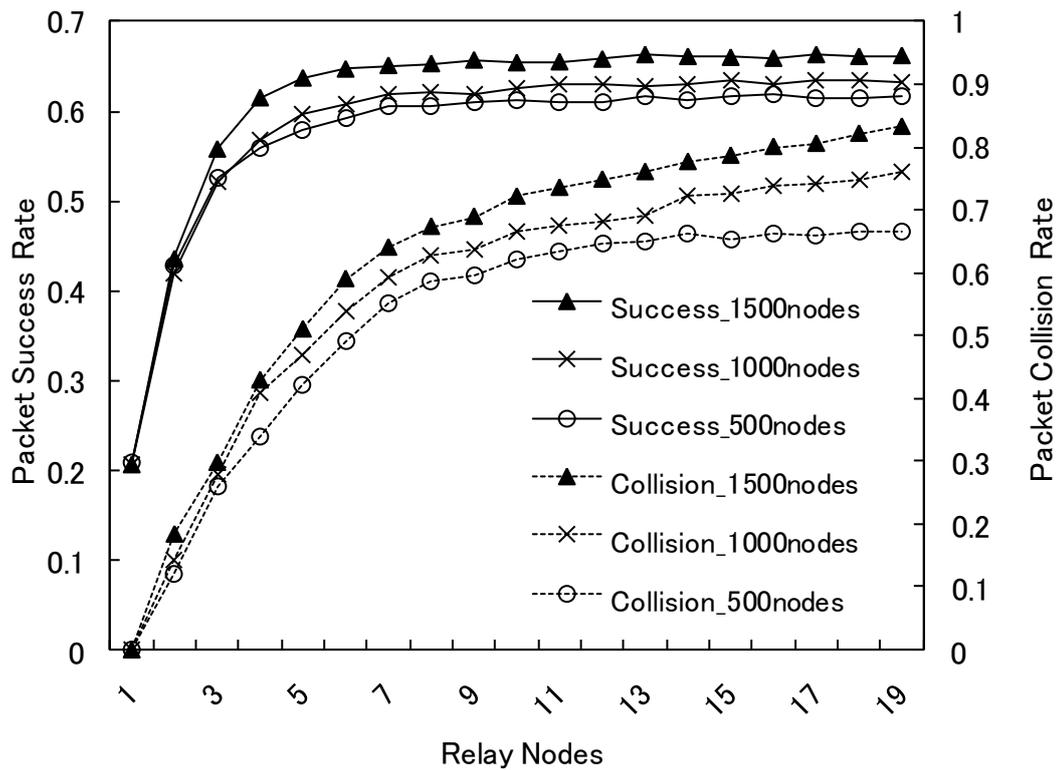


図 4-11: 転送依頼端末数別パケット送信成功率とパケット衝突率

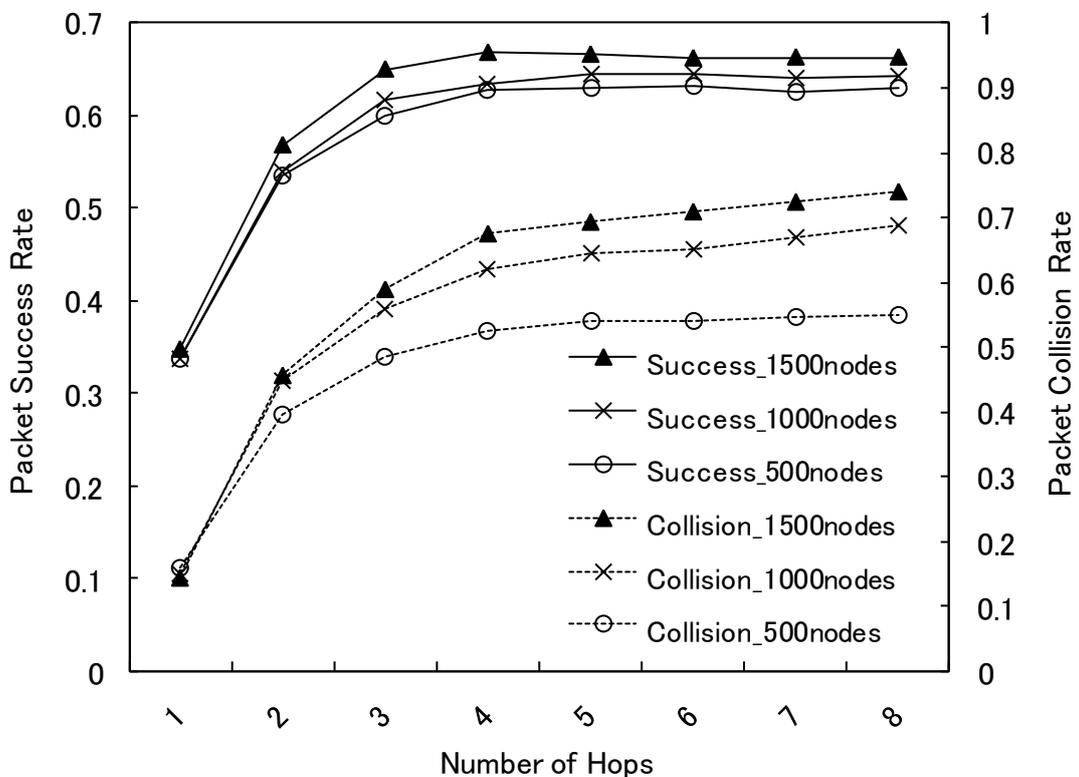


図 4-12: hop 数別パケット送信成功率とパケット衝突率

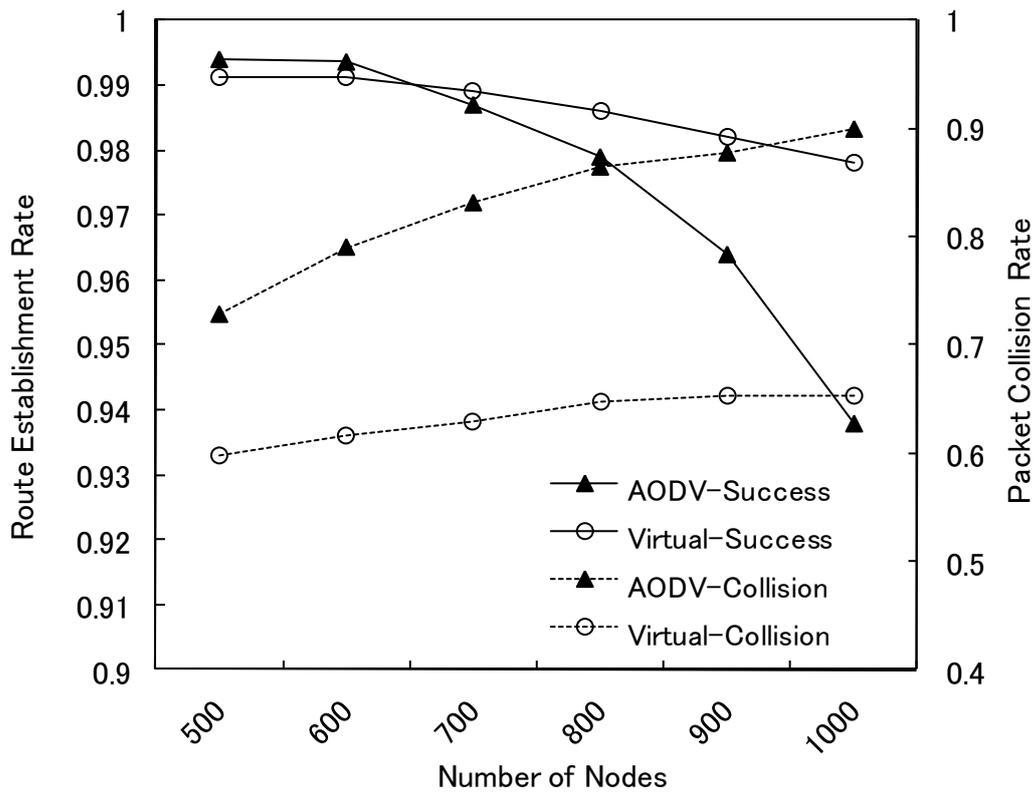


図 4-13: ルート構築率とパケット衝突率の比較(1/2)

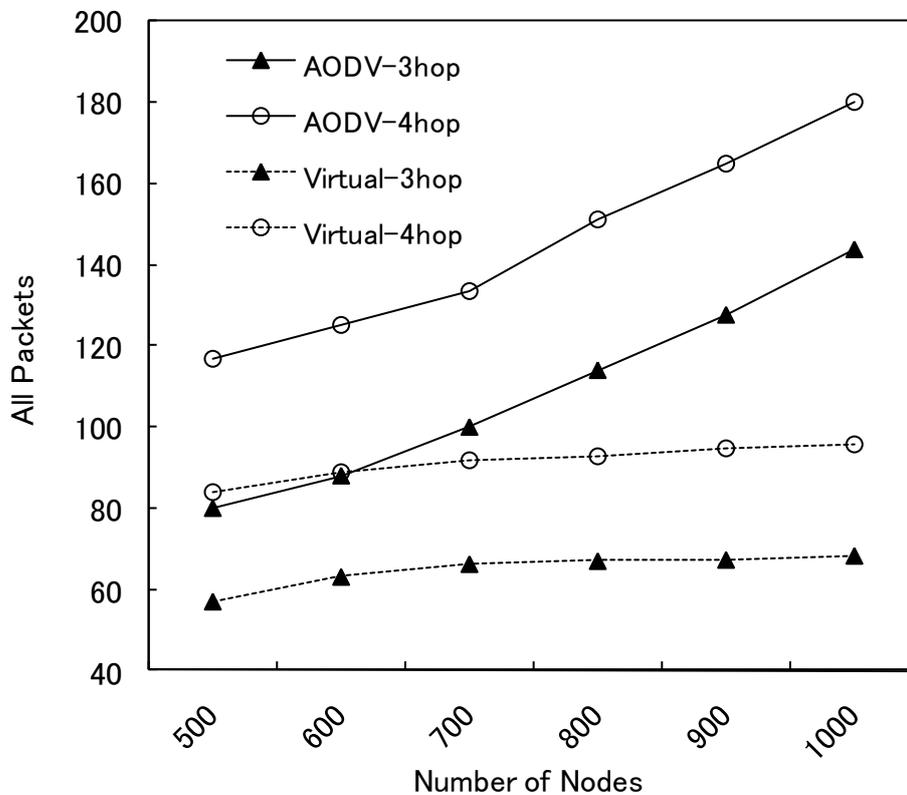


図 4-14: 制御パケットの総数の比較(2/2)

第4章 バーチャルマップを用いたユニキャストマルチホップモバイル通信方式

図 4-11 は端末を 500, 1000, 1500 端末と増やし、転送依頼端末数を 1 から 20 端末までと制限した際の、パケット送信成功率（実線）とパケット衝突率（点線）を求めたグラフである。このグラフから、転送依頼端末数が 5 端末から 7 端末以上でパケット送信成功率が飽和する。転送依頼端末数をそれ以上増やしてもパケット送信成功率は向上しないが、パケット衝突率は転送依頼端末数の増加に伴い悪化することがわかる。転送依頼端末数を増やせば、いずれ AODV 適用型モデルと転送依頼端末数が変わらなくなってしまう。よって本モデルでは転送依頼端末数の制限を 7 端末までとする。

図 4-12 は転送依頼端末数の制限を 7 端末とし hop 数に制限を与えた場合の 500, 1000, 1500 端末におけるパケット送信成功率（実線）とパケット衝突率（点線）を同様に求めたグラフである。このグラフから、本モデルのシミュレーション環境で定義するフィールドにおいては、hop 数が 4hop から 5hop でパケット送信成功率が飽和し、それ以上 hop 数の制限を増やしてもパケット送信成功率は伸びず、パケット衝突率が増加してしまうことが読み取れる。以上の結果を考慮し、転送依頼端末数を 7 端末、パケットの有効期限を 200[slot]、最大 hop 数を 4hop として、AODV 適用型モデルとの性能比較を行った。

図 4-13 は、AODV 適用型モデルとバーチャルマップモデルについて端末数を 500 から 1000 端末と増やした際のルート構築率（実線）とパケット衝突率（点線）を求めたグラフである。AODV 適用型モデル（▲）は端末の増加に伴いパケット衝突率が増加しルート構築率が急激に減少しているのに対し、バーチャルマップモデル（○）は端末の増加に伴うパケット衝突率増加の割合が少ないため、ルート構築率の急速な悪化は AODV 適用型モデルに比べ比較的ゆるやかとなる。ここで、図 3-9、図 4-11、図 4-12 のパケット送信成功率で比較すると、端末数 1000 端末の場合、AODV 適用型モデル 0.726、バーチャルマップモデル（依頼端末数 7 端末の場合）0.618、（制限 hop 数 4hop の場合）0.635 となり、バーチャルマップモデルの方がパケット送信成功率は悪化している。しかし、バーチャルマップモデルにおける制御パケットは、とても情報量の少ない Mini_Slot 上で送信される近隣状況把握パケットと ACK までも含んでいるため以上の結果になったと考えられる。また、図 3-10、図 4-11、図 4-12 のパケット衝突率で比較すると、端末 1000 端末の場合、AODV 適用型モデル 0.755、バーチャルマップモデル（依頼端末数 7 端末の場合）0.594、（制限 hop 数 4hop の場合）0.62 となり、バーチャルマップモデルの方がパケット衝突を抑えることができている。つまり、衝突しないで使用できたスロット数の割合が多いため図 4-13 のルート構築率において、端末数増加による劣化を軽減できると判断できる。つまり、AODV 適用型モデルはパケット送信成功率が高くてもパケット衝突率が増加するためルート構築率が悪化することがわかる。

図 4-14 はそれぞれの方式における、制御パケットの総数の平均値を hop 数制限別に求めたグラフである。バーチャルマップモデル（実線）は hop 数の制限を 3hop（▲）から 4hop（○）と増やす影響のみを受けて全パケット数が増加しているのに対し、AODV 適用型モデル（点線）は hop 数の増加のみならず端末数の増加の影響をも受けて制御パケット

数が増加していることがわかる。このことから、バーチャルマップモデルは必要な端末に通信要求パケットを送信できていると判断できる。

4.4 むすび

バーチャルマップモデルを用いることで通信要求パケットを 360° 全方向に送信することができ、通信中の接続時間が長くなるようなネットワークを構築できる。方法として、近隣端末の ACK 情報に近隣端末同士の ACK 受信電力レベルをのせることで、端末間の距離を推定して、バーチャルマップを作成する。次に、近い端末同士をグルーピングして、グループ内の 1 端末に通信要求パケットをユニキャスト転送する方法である。また、グルーピングされたグループから 1 端末を選択する方法として、推奨 E_b/N_0 値を用いる方法を提案し、この値を算出した。AODV 適用型モデルでは、通信要求パケットの送信回数は 3 回までなら性能悪化はない。同様にバーチャルマップモデルでも近隣状況把握パケットの有効送信回数を求めた結果、送信回数を 3 回としても性能悪化がないことが示された。同時にグループ数、つまり通信要求パケットの転送依頼端末数は、5 から 7 端末でパフォーマンスが最大となることを示した。

AODV 適用型モデルとの比較を行った結果、バーチャルマップモデルを用いればルート構築率が劣化せずに、パケット衝突率を抑えられることが明らかとなった。また、制御パケット数も減少させることができる。

以上の結果から、バーチャルマップモデルは転送依頼端末数を制限することで、他端末への負担を軽減することができる。同時に推奨 E_b/N_0 値をもとにネットワークを構築することから、通話時間を長くする QoS 制御が行えるため、通話に適したモデルであることが示された。

第5章

圏外経過時間を考慮したユニキャストマルチホップモバイル通信方式

5.1 まえがき

モバイル通信では各端末は移動を行うため、圏内になったり、圏外になったりと、その状態は随時変化している。ある端末が圏外になったとしても、その圏外にいる時間が短ければ比較的基地局のカバーエリアに近い場所にいると推測される。そこで、各端末は自端末が圏外になったことを監視し、それ以降の時間を保持し、この時間から圏内エリアまでの距離を推測する方法を提案する。

5.2 圏外経過時間考慮モデル

図 5-1 に示すように端末が圏外になった時間を t とすると各端末が保持する圏外になってからの時間というパラメータと、各端末の基地局カバーエリアからの距離というパラメータとの間に正の相関が成り立つと考えられる。よって圏外にいる時間をもとに通信要求パケットの転送依頼端末を選択するモデルを「圏外経過時間考慮モデル」として提案する。

圏外端末が図 5-1 のように任意の場所に存在すると仮定する。ここで、各端末が自端末の位置を把握することは現状では不可能である。しかし、圏外に移った時からの経過時間を保持しておけば、この時間から圏内エリアまでの距離を推定することは可能であると考えられる。そこで圏外端末は、基地局との通信が不可能になってからの経過時間を、圏外エリアにいる間中、随時更新させて保持しておくことを前提とする。ここで、この圏外にいる経過時間を「圏外経過時間」と呼ぶ。圏外経過時間が短い端末を優先的に通信要求パケットの転送依頼端末に選択することで、圏内端末に早期に通信要求パケットが到達すると予想される。

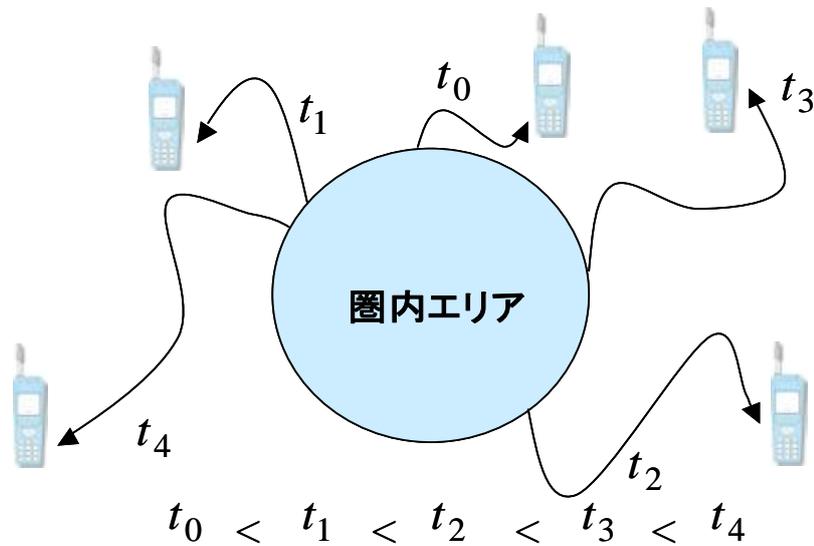


図 5-1: 圏外経過時間とカバーエリアの関係

具体的には、呼発生端末ないし転送依頼端末から送信された近隣状況把握パケットを受信した際に、自端末と圏内エリアまでの距離の相対的な位置情報を伝えるために、ACKに圏外経過時間を載せる。この情報を得た呼発生端末ないし転送依頼端末は、時間というパラメータをもとに、近隣端末の圏内エリアまで距離を相対的に導き出し、圏内エリアに最も近いとされる端末を通信要求パケットの転送依頼端末に決定する。ここで、本モデルでは圏外端末の圏内エリアからの距離 l と各端末の保持する圏外経過時間 t_{out} との関係は比例の関係にあるとして、 l は圏外経過時間を用いて

$$l \text{ [m]} = at_{out} \text{ [sec]} \quad (5-1)$$

として表す。また、ここで a は定数であり、本提案モデルでは簡単のため $a=1$ として計算を行う。

5.2.1 モデルの概要

圏外経過時間考慮モデルでは、各端末は自端末が圏内であるか圏外であるかを常に監視し、図 5-1 に示すように圏外に移ってからの経過時間を $t_0, t_1, t_2 \dots$ としてリアルタイムに保持しておく。この時間が圏外経過時間である。

以下に、圏外経過時間考慮モデルを用いてネットワークを構築するまでの具体的なアルゴリズムを示す。

- i) 呼発生端末ないし転送依頼端末は近隣端末に近隣状況把握パケットをブロードキャストする。ここでこの端末を端末 R と呼ぶ。
- ii) 近隣状況把握パケットを受信した端末は、自端末の情報として圏外経過時間を ACK に付加して返信する。

第5章 圏外経過時間を考慮したユニキャストマルチホップモバイル通信方式

- iii) この圏外経過時間が短ければ短いほど基地局のカバーエリアに近いと考えられるので、近隣端末の圏外経過時間 $t_0, t_1, t_2 \dots$ を用いて、基地局のカバーエリアまでの推奨距離 $L_0, L_1, L_2 \dots$ を算出する。
- iv) 端末 R は基地局カバーエリアまでの推定距離が最も短い順に転送依頼端末を選択して、通信要求パケットをユニキャストで送信する。ここで、転送依頼端末数は最大転送依頼端末数として定義する。
- v) 通信要求パケット受け取った端末は自端末が圏内であれば **RREP** を返信し、圏外である場合は端末 R と同様に i から iv) の動作を行い、ユニキャスト先を選択して通信要求パケットを転送する。
- vi) これを圏内端末が発見されるか、通信要求パケットの hop 数とパケット有効期限が制限値に至るまで繰り返す。
- vii) 呼発生端末が **RREP** を受信すると、**RREP** が辿ってきたルートの端末を中継端末として、基地局とのネットワークを構築し通話を開始する。

ここで、マルチホップで構築されたネットワークは、呼発生端末が通話を終えるか、中継端末が通話を開始したり、移動することでネットワークが物理的に切れたりするまで使用される。もし、通話中に切断された場合は、再度ネットワーク構築を試みる。また本提案モデルでは、制御パケットを送信する際に、パケットの衝突を回避するため送信タイミングをランダムに設定している。このランダム送信タイミングの最大値を **MaxShiftSlot** と呼ぶ。

5.2.2 転送依頼端末の条件

圏外経過時間考慮モデルは、圏内端末を早期に発見することを目的としている。よって、ユニキャスト先となる転送依頼端末の条件は、基地局のカバーエリアに近い端末となる。そこで、転送依頼端末を選ぶ方法として、近隣端末が保持している圏外経過時間から基地局のカバーエリアまでの距離を推測して、この距離の短い端末から順に最大転送依頼端末数だけ転送依頼端末を選択する。この端末にユニキャストにて通信要求パケットを送信することで、ネットワークの早期発見が期待できる。

5.3 シミュレーション評価

圏外経過時間考慮モデルを計算機シミュレーションにより性能評価し、**AODV** 適用型モデルとの違いを比較する。バーチャルマップモデルの際と同様に、近隣端末が最大転送依頼端末数を超える場合に、圏外経過時間考慮モデルを利用する。

5.3.1 シミュレーション諸元

表 5-1 に示すパラメータをベースにしてシミュレーションを行う。

表 5-1: シミュレーションパラメータ

フィールド	1000 [m] × 1000 [m]
端末の移動速度	4 [km / h]
端末の移動方向	8 方向—ランダム決定
基地局の位置	(500 [m] , 500 [m])
周波数帯域幅	25 [kHz]
シミュレーション時間	端末数にあわせて変動
Slot 間隔	0.01 [sec]
Mini_Slot	0.1 [slot]
基地局-端末間通信方式	PDC 方式
端末間通信方式	1 本の通話要求チャンネル 十分な通話チャンネル TDMA 方式
平均通話時間	180 [sec]
呼発生率	0.00000065
所要 E_b / N_0	3 [dB]
伝搬損失	< 基地局—端末間 > 池上モデル < 端末間 > 平面大地伝搬モデル
基地局電力	1000 [mW]
端末電力	100 [mW]
パケット有効期限	5 [sec]
パケット送信回数	3 回
Hop 数	3hop
端末数	500-1000

5.3.2 シミュレーション結果及び比較評価

圏外経過時間考慮モデルについて計算機シミュレーションを用い AODV 適用型モデルとの比較検討を行う。前章と同様に端末はフィールド内にランダム配置され、8 方向をランダムに選択し移動するが、フィールドから外れた場合は 180° 方向を変え、必ずフィールド内を移動する。ポワソン分布で呼発し通話時間は指数分布により求められる。評価方法としては以下の方法を用いた。

- ルート構築率 (Route Establishment Rate) = 圏外端末が呼を発生して圏内端末とのルートを構築する際の、ルート構築要求数あたりの圏内端末が見つかりルートを構築できた数の割合
- パケット衝突率 (Packet Collision Rate) = 制御パケットが送信された総スロット数あたりのパケット衝突が起きたスロット数の割合
- ルート発見平均スロット数 (Waiting Slots) = 呼発生端末が圏内端末を発見できた場合にネットワークを構築するまでにかかったスロット数の平均値

前提として、各端末は圏外になった時刻からの経過時間をリアルタイムに保持している。

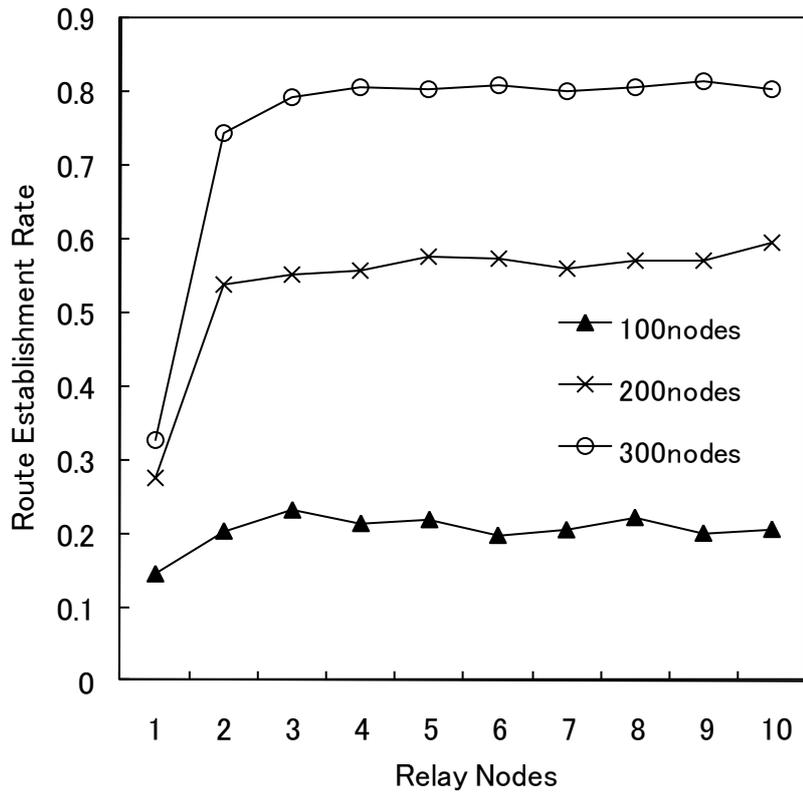


図 5-2: 転送依頼端末数別ルート構築率

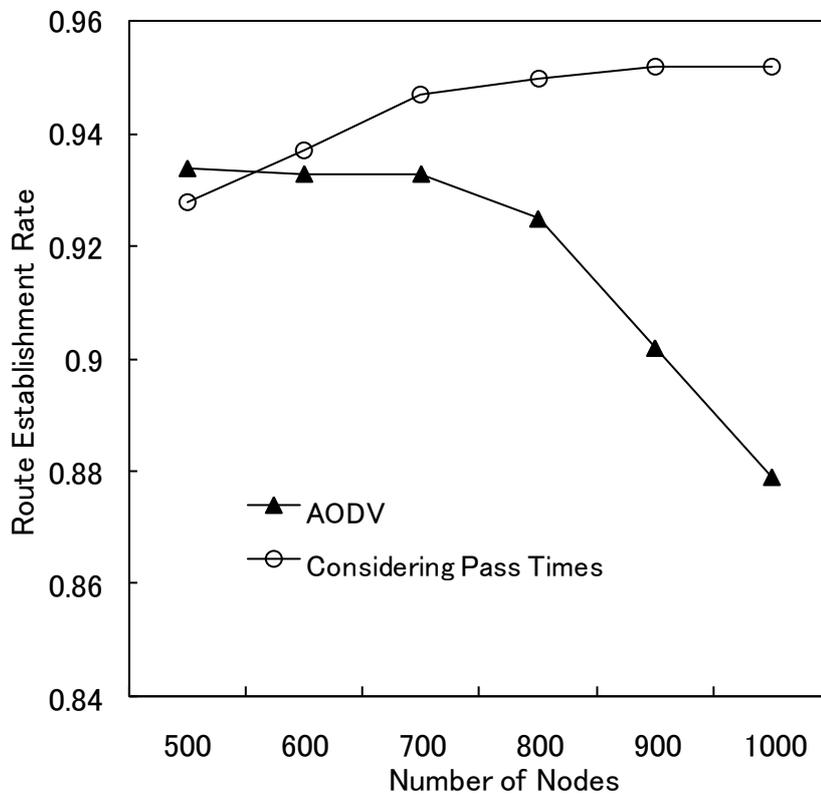


図 5-3: ルート構築率の比較(1/3)

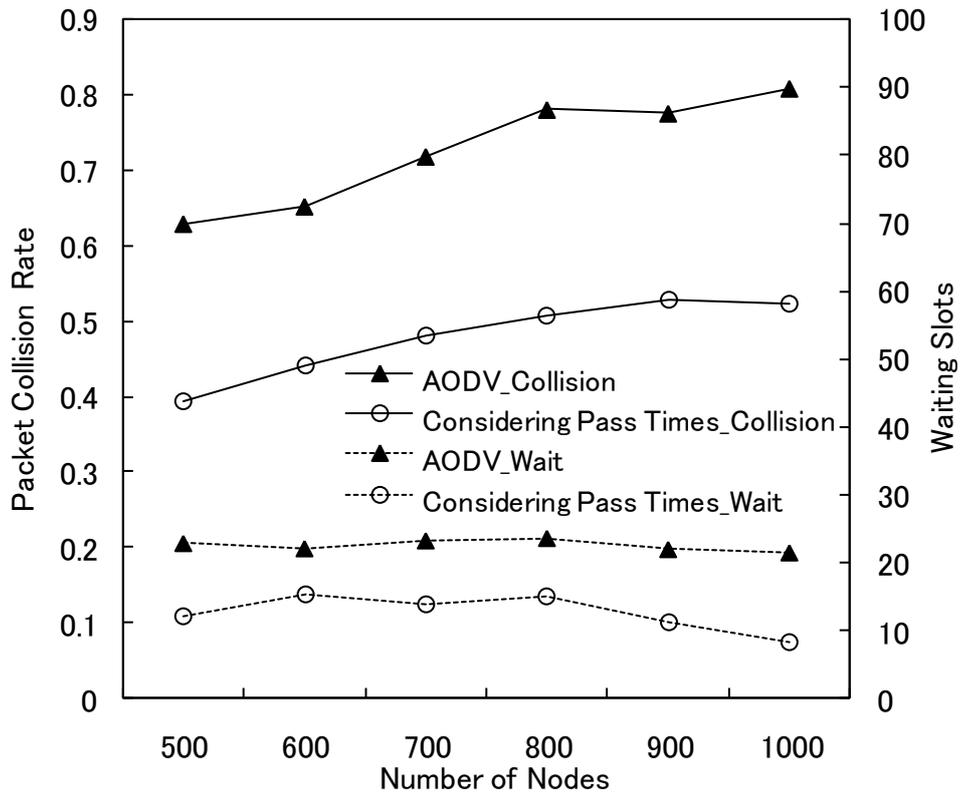


図 5-4: パケット衝突率とルート発見平均スロット数の比較(2/3)

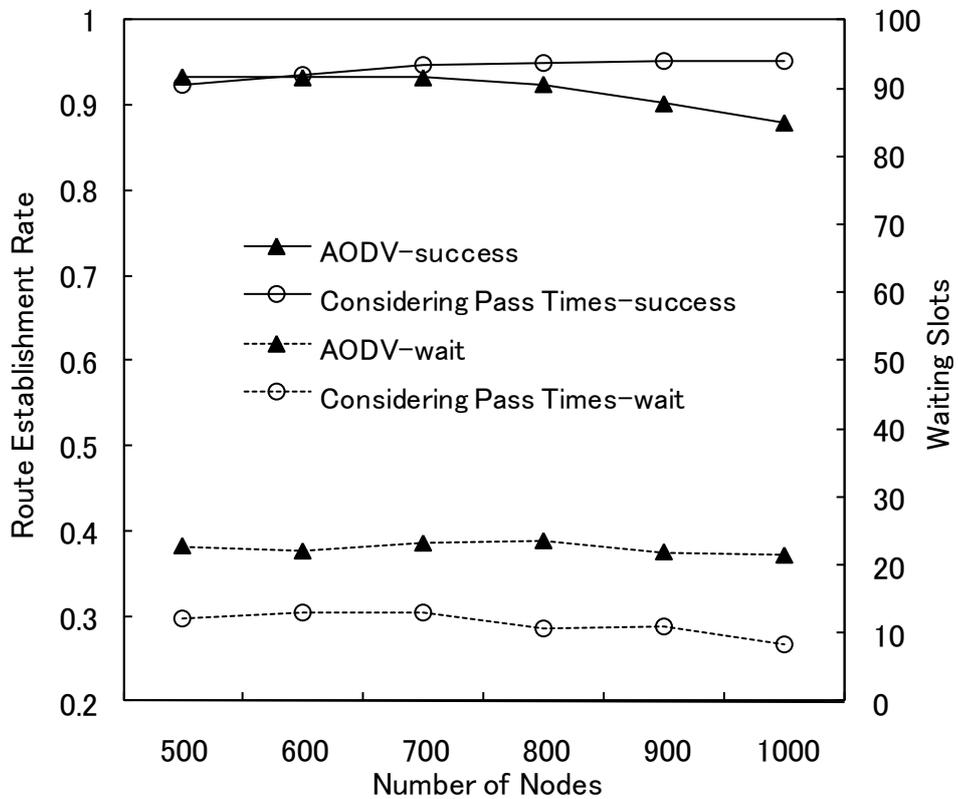


図 5-5: ルート構築率とルート発見平均スロット数の比較(3/3)

第5章 圏外経過時間を考慮したユニキャストマルチホップモバイル通信方式

図 5-2 は、シミュレーションフィールド内の端末数を 100 端末、200 端末、300 端末と増やして、転送依頼端末数を変化させた場合のルート構築率を求めたグラフである。このグラフから、圏外経過時間考慮モデルを適用すれば、依頼端末が 3-5 端末でルート構築率が最大値に達することがわかる。図 4-11 からバーチャルマップモデルを利用して転送依頼端末を選択した際の有効な最大転送依頼端末数は 5 から 7 端末であったが、圏外経過時間考慮モデルを適用すれば依頼端末数を削減できることが示された。

制御パケットの最大送信回数は 3 回、圏外経過時間考慮モデルの転送依頼端末数は 4 端末として AODV 適用型モデルとの比較をシミュレーションにより評価した。▲が AODV 適用型モデルであり、○が圏外経過時間考慮モデルの結果を示している。図 5-3 はルート構築率を比較したグラフである。端末数が少ない場合は AODV 適用型モデルのルート構築率が若干良くなっているが、端末の増加に伴い悪化する。しかし、圏外経過時間モデルは端末の増加に伴うルート構築率の悪化は見られず、むしろ性能が向上することが示された。

図 5-4 はパケット衝突率とルート発見平均スロット数を求めたグラフである。第 4 章で提案したバーチャルマップモデルのパケット衝突率は、端末数の増加に伴い比較的ゆるやかに増えているのに対し、圏外経過時間考慮モデルは AODV 適用型モデルと同様、増加傾向が若干みられる。これは、制御パケットが基地局のカバーエリアに近い端末に同タイミングで集中的に送信されることが原因であると考えられる。避けるためには MaxShiftSlot を変化させればよいと考えられる。図 5-4 のグラフから AODV 型モデルに比べると圏外経過時間考慮モデルはパケット衝突率を軽減できていることがわかり、加えてネットワークを早期に構築できることも示された。

図 5-5 は MaxShiftSlot=10 として基地局の通話可能エリアから 2 倍以上離れた端末が呼を発生した際のルート発見平均スロット数と、ルート構築率を表したものである。▲が AODV 適用型モデルであり、○が圏外経過時間考慮モデル（依頼端末数 4 端末）の結果を示している。両モデルともルート発見平均スロット数に関して端末の増加に伴う変化はほとんど見られないが、圏外経過時間考慮モデルは、端末数が多い場合は半分以上早くルートが発見できることが読み取れる。AODV 適用型モデルではルート構築率は端末の増加に伴い減少するが、圏外経過時間考慮モデルを用いれば端末が増えても悪化しない。

5.4 むすび

圏外経過時間考慮モデルは通信要求パケットを基地局のカバーエリアに近い端末に送ることで、早期に圏内端末を発見することができる。これは呼発生端末ないし転送依頼端末は圏外経過時間情報から基地局までの距離を推測して、基地局に近いと思われる端末に通信要求パケット転送を依頼する方法により実現できる。

圏外経過時間考慮モデルを AODV 適用型モデルと性能比較評価を行った結果、パケット衝突率を抑え、ルートも早期に発見できることが示された。またルート構築率は端末の増

第5章 圏外経過時間を考慮したユニキャストマルチホップモバイル通信方式

加に伴い向上することから、より優れたモデルであるといえる。以上から、圏外経過時間考慮モデルは、AODV適用型モデルと比較して、ルート構築率を満たしつつ、パケットの衝突を抑えられることがわかった。しかし、シミュレーション上にある端末数が少ない場合はパケットの衝突率の軽減がルート構築率の向上に影響を与えることはなかった。これは転送依頼端末数が少ないためであると考えられる。よって、状況に応じて最大転送依頼端末数や、パケットの有効期限について適宜変化させることも効果的である。

また、圏外経過時間考慮モデルは早期にネットワークを構築できることから、パケット通信のような一時的にネットワークを構築したい場面に有効である。前章で、圏内端末が複数端末存在する場合に有効な中継端末選択方法として基地局下り受信電力考慮モデルを提案した。この基地局下り受信電力考慮モデルはバーチャルマップモデルと圏外経過時間考慮モデルとの両モデルに適用することで、より効果的なネットワーク確立が実現できるが、特に圏外経過時間考慮モデルのように一時的に接続するモデルに有効である。

第6章

メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

6.1 まえがき

無線通信技術の発展に伴い、ユビキタス社会を支えるひとつのサービスとして FMC (Fixed and Mobile Convergence) が注目されている。FMC を実現する重要なコンポーネントとなるのが IMS (IP Multimedia Subsystem) がある。現在、屋外では GSM などのセルラ網と通信を行い、無線 LAN アクセスポイント圏内では無線 LAN とやりとりをする UMA (Unlicensed Mobile Access) が提案されている。IMS に先駆けて UMA が適用された FMC のサービスが動き始めている。

このような多様化するネットワークサービスにおける最先端な動向に適応するため、新たな通信形態の開発が盛んに行われている。各家庭にある固定電話に目を向けると、アナログからデジタルへ移行し、PHS を子機として利用できる第 2 世帯デジタルコードレス電話の開発がされている。また、2.4GHz 帯デジタルコードレス電話は盗聴されにくくなったこともあり、固定電話は無線通信技術を搭載したコードレス電話として広く普及していった[19]。またインターネットの普及に伴い、家庭内でネットに接続する PC の数も増えている。そのため、企業だけでなく家庭にも無線 LAN の設置が広まっている。同時に、新たな固定電話としてインターネットを利用する IP 電話も話題を呼んでおり、固定電話におけるサービスの競争も最近注目される話題である。

同時に、マルチホップネットワークは、ユビキタスシステム実現のための重要なネットワーク形態として、世界中で活発な研究がなされている。

そこで本研究では、このような各家庭にある無線通信用の固定端末にマルチホップネットワークを適用するモデルを提案する。各家庭の固定端末にルーチング機能を搭載させることで、近隣にある端末同士の通信において、アドホックにネットワークを構築する。このような通信システムを、「家庭用固定無線端末を用いたマルチホップ通信モデル」として提案する。

本提案モデルは、メトロポリタンエリアのような比較的近くへの通信にマルチホップネットワークを用い、それ以外は既存の電話交換局を介した電話回線を利用して通信を行う

第6章 メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

ネットワークモデルである。本章では、まず家庭用固定無線端末を用いたマルチホップ通信モデルの特性を評価するため呼損率に着目して、理論解析を行うことで理論式を導く。また、計算機シミュレーションも行い理論式とシミュレーションの整合性を示す。更に、呼損率と強制切断率についてシミュレーションにより評価しモデルの特性を明らかにする。以上の評価から、本提案モデルの問題点を提起し、改良案を考察する。

6.2 モデルの概要

家庭用固定無線端末を用いたマルチホップ通信モデルは、各家庭にある家電製品の無線機能に着目し、コードレス電話などの固定無線端末にマルチホップのルーチング機能を付加して端末同士が即座にネットワークを構築するモデルである。以降、この固定無線端末のことをノードと呼ぶ。もし、通話を行いたい宛先ノードが通信可能距離内にいない場合は、途中のノードを中継ノードとして利用することで、ノードのみでアドホックにネットワークを確立する。本提案モデルは、メトロポリタンエリア内での通信においてマルチホップネットワークを利用して、エリア外にあるノードへの通信においては通常通り、既存の電話回線などの有線網を介して通信を行う。

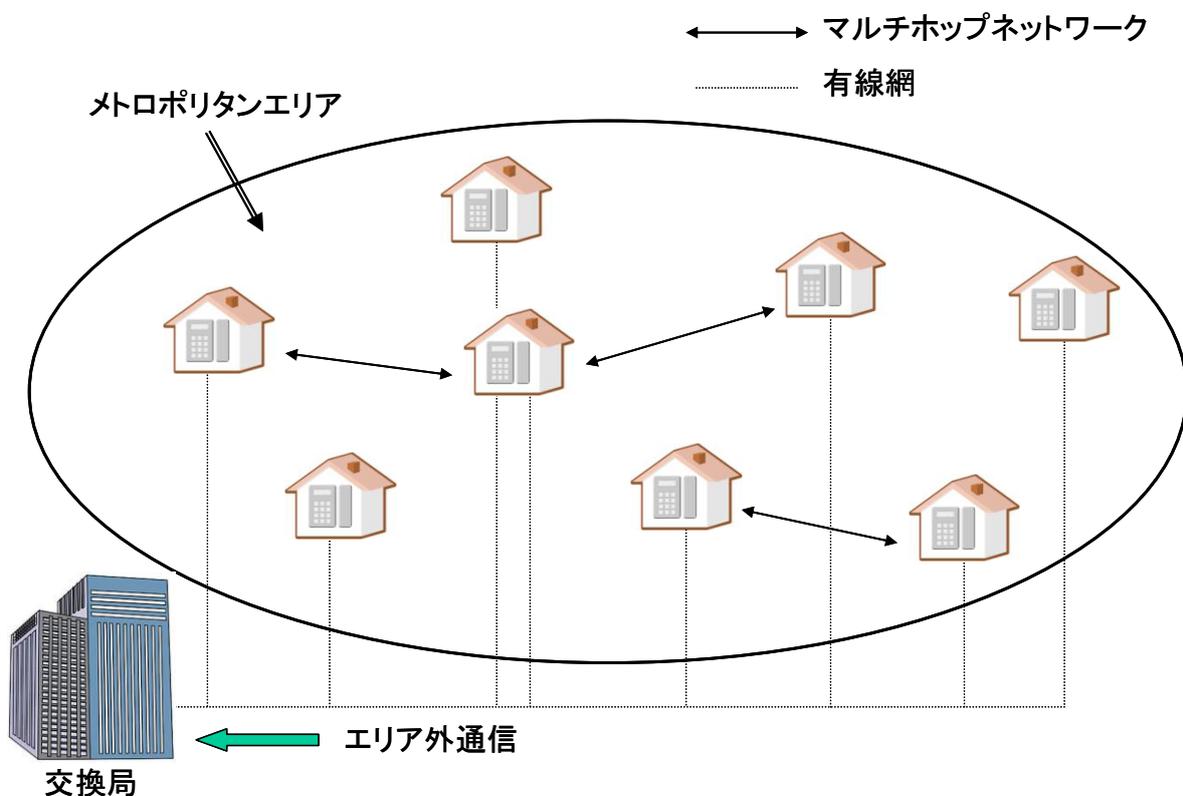


図 6-1: 家庭用固定無線端末を用いたマルチホップ通信モデル

第6章 メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

具体的には図 6-1 に示すように、メトロポリタンエリア内において、ノードは太線両矢印で示すようにマルチホップを用いてネットワークを構築し通話を行う。また、マルチホップネットワークを構築できない場合や、メトロポリタンエリア外への通信においては、図の点線で示すように、既存の交換局を介し通常通り有線網を使用して通信を行う。つまり、現存する固定無線端末とマルチホップネットワークを融合させる新たなネットワークモデルといえる。このモデルの特徴として、マルチホップを用いて交換局を介さないで、簡易に通信用のネットワークを構築することで、交換局の負荷を軽減でき、安価な通信が実現できる。また、災害時において交換局が機能しなくなった場合や、回線切断、機器損傷等の直接的故障により通信が不可能となった際にも、ノードさえあれば通信を行えるので、特に有効的なモデルであると考えられる。本研究ではまず固定無線端末マルチホップモデルの呼損率を算出する理論式を導く。その後、理論式の性能を評価するためにシミュレーションを行うことで整合性を示す。

6.2.1 モデルの定義

理論式を導くために必要な変数を定義する。ノードはある発呼率をもとに発呼し、マルチホップネットワークを用いて宛先までのルートが構築できれば通話を開始する。もしルートを構築できない場合は呼損とする。以下、発呼したノードをノード S、発呼ノードの宛先ノードをノード D と総称する。図 6-2 はメトロポリタンエリア内を模したフィールド上にあるノードの状況を表している。小さい○はノードのある場所を示しており、ノード S を囲む大きな円はノード S の通信可能距離を示す。各ノードに定義する変数やシミュレーションフィールドの変数は表 6-1 のように設定する。

表 6-1: 変数の定義

$L [m]$	メトロポリタンエリア内フィールド幅
λ	発呼率
μ	通話終了率
$N [node]$	メトロポリタンエリア内にある全ノード数
$D [node / m^2]$	ノードの密度
$l [m]$	ノード S とノード D 間の距離
$r [m]$	ノードの通信可能距離
$H_{max} [hop]$	最大中継ノード数

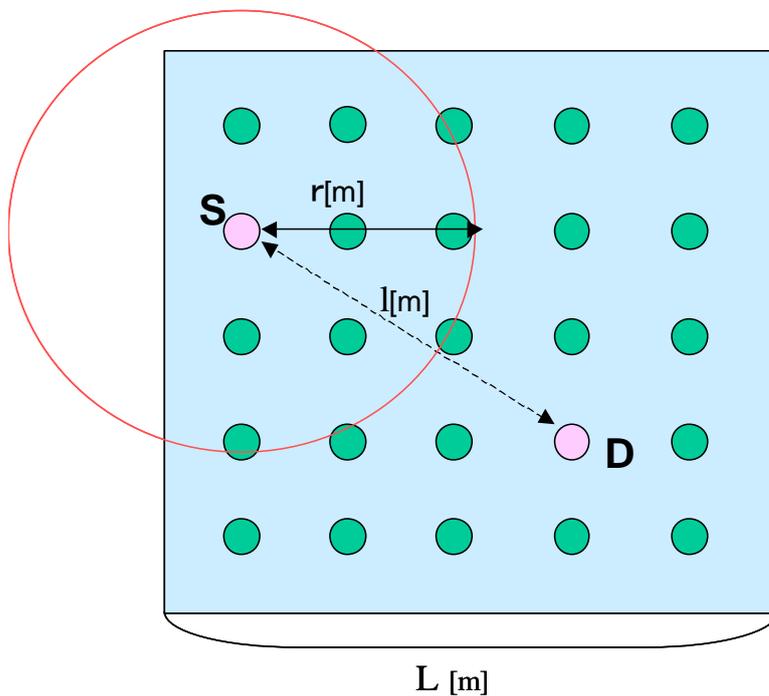


図 6-2: ノードの状況と変数の関係

ここで、メトロポリタンフィールドは一辺が $L[m]$ の正方形と定義する。ノードの密度 D はメトロポリタンエリア内にある全ノード数 N とシミュレーションフィールドの範囲 L を用いて以下の式で求めることができる。

$$D = \frac{N}{L^2} [\text{node}/m^2] \quad (6-1)$$

6.2.2 状態確率の定義

家庭用固定無線端末の状態について検討する。各ノードの状態としては表 6-2 に示すように、何もしていない状態である「Free」、自ノードが発呼することで通話を開始している状態である「Busy_Caller」(Talk)、他のノードからの着信により通話している状態である「Busy_Callee」(Destination Talk)、他ノード間通話における中継ノードとなっている状態である「Relay」の4つの状態があげられる。通常はFreeの状態にいるが、発呼してマルチホップネットワークを構築できればTalk状態となる。また着信によりマルチホップネットワークを構築して通話を開始すればDestination Talkの状態となり、自ノードがFreeであった際にマルチホップネットワークを構築するための中継ノードとなればRelayの状態となる。

メトロポリタンエリア内には図 6-3 で示すように、さまざまな状態のノードが存在する。

第6章 メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

それぞれの状態に対応する状態確率を表 6-3 に示し、呼損率を求める上で必要となる確率変数を表 6-4 に定義する。

表 6-2: ノードの状態

Free	何もしていない
Busy_Caller(Talk)	発呼による通話中
Busy_Callee(Destination Talk)	着信による通話中
Relay	中継中

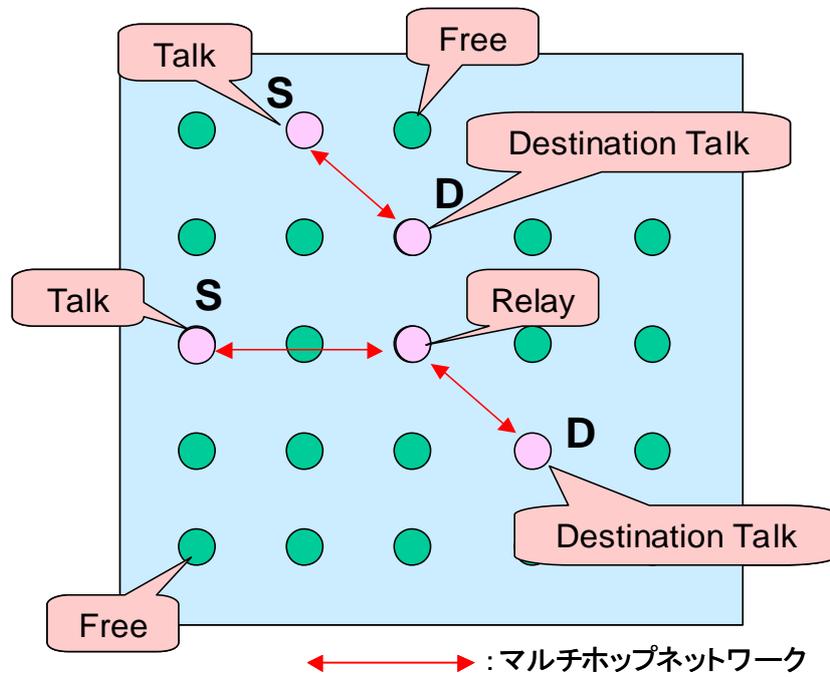


図 6-3: ノードの状況と状態の関係

表 6-3: ノードの状態確率

P_f	Free の状態
P_{br}	Busy_Caller の状態
P_{be}	Busy_Callee の状態
P_r	Relay の状態

表 6-4: 確率変数

$P(n)$	n[hop]でルート構築する確率
P_{fbe}	着信して通話開始する確率
P_{fr}	中継ノードになる確率
P_{cut}	強制切断する確率

以上から、それぞれの状態確率を用いて以下の式が成り立つ。

$$P_f + P_{br} + P_{be} + P_r = 1 \quad (6-2)$$

6.3 理論式の算出

家庭用固定無線端末を用いたマルチホップ通信モデルの特性を調べるために、呼損率を求める理論式を導く。まずは、提案モデルのパラメータを示し、ノードの状態について検討する。次にノードの状態確率を考察し、ノードの状態遷移図を作成して呼損率の算出を図り理論式を確立する。

6.3.1 物理的側面による関係式

ノードが 1hop で通話できる状況について物理的な側面から確率式を求めてみる。確率 $P(1)$ を求めるためには、以下の条件を満たす必要がある。

【 $P(1)$ となる条件】

事象 A : ノード S の近隣にノード D がいる $\Rightarrow 0 < l \leq r$

事象 B : ノード D が Free である

事象 A と事象 B が起こる確率、つまりノード S の近隣にノード D がいる事象 A と、ノード D が Free である事象 B について、事象 A と事象 B は互いに独立なので

$$P(1) = P(A) \times P(B) \quad (6-3)$$

が成り立ち、 $P(1)$ は状態確率 P_f を用いて、次ように表される。

$$P(A) = \frac{\pi^2 D}{N} \quad (6-4)$$

$$P(B) = P_f \quad (6-5)$$

$$\therefore P(1) = P(A) \times P(B) = \frac{\pi r^2 D}{N} P_f \quad (6-6)$$

次にノードが Free である状態確率 P_f を次節の状態遷移図から求める。

6.3.2 状態遷移図による関係式

ここでは、 P_f を求めるため、1hop の場合におけるノードの状態について状態遷移図から導くことを試みる。Hmax=1hop である場合のノードは、Free, Busy Caller, Busy Callee の3つの状態をとる。以下にそれぞれの状態が変化する際の条件を示す。

【Free のノードの状態変化】

- i) λ で呼を発生して通話可能であれば Busy Caller となる。
- ii) 自ノードが呼を発生していないときに着信による通話が可能であれば Busy Callee となる。
- iii) i, ii でない場合は Free のままである。

【Busy Caller のノードの状態変化】

- i) 通話終了率により通話を終了しない場合 Busy Caller のままである。
- ii) 通話終了率から通話終了となれば Free に戻る。

【Busy Callee のノードの状態変化】

- i) 通話終了率により通話を終了しない場合 Busy Callee のままである。
- ii) 通話終了率から通話終了となれば Free に戻る。

以上の状態変化を考慮してノードの状態遷移図を作成する。図 6-4 は 1hop 時におけるノードの状態遷移図である。 P_{fbe} は着信があり通話できる確率である。

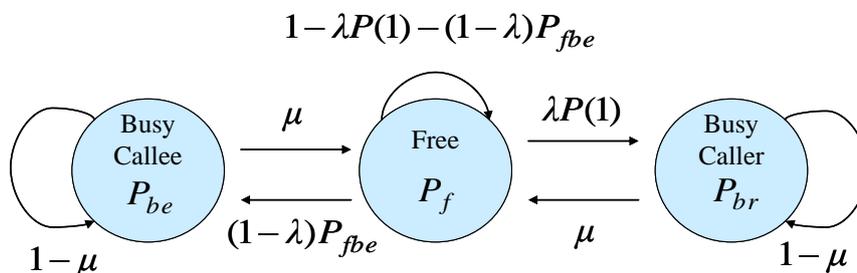


図 6-4: 1hop のノード状態遷移図

第6章 メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

ここで着目すべき状態確率は、Free である状態確率 P_f と、自ノードが発呼して通話している Busy Caller の状態確率 P_{br} と、着信により通話をしている Busy Callee の状態確率 P_{be} がある。以上の状態確率は、着信があり通話できる確率 P_{fbe} と、1hop で通話可能な確率を $P(1)$ を用いて、図 6-4 の状態遷移図から次の式を導くことができる。

$$P_f + P_{br} + P_{be} = 1 \quad (6-7)$$

$$P_f = \mu P_{br} + \mu P_{be} + \{1 - \lambda P(1) - (1 - \lambda) P_{fbe}\} P_f \quad (6-8)$$

$$P_f = \frac{\mu N(N-1)}{N(N-1)(\mu + \lambda P(1)) + (1 - \lambda) \lambda \pi r^2 D} \quad (6-9)$$

これらの式から確率 P_f は確率 $P(1)$ と P_{fbe} を用いて以下の式で表すことができる。

$$P_f = \frac{\mu}{\lambda P(1) + (1 - \lambda) P_{fbe} + \mu} \quad (6-10)$$

次に確率 P_{fbe} を求める。確率 P_{fbe} は以下の条件を満たす必要がある。

【着信があり通話できる P_{fbe} となる条件】

事象 A：自ノードを宛先としているノードが発呼する

事象 B：発呼したノードが近隣にある

ここで、事象 A がおきる確率を $P(A)$ 、事象 B がおきる確率を $P(B)$ とする。確率 $P(A)$ は次のように置き換えることができる。

$$\begin{aligned} P(A) &= (\text{自ノードを宛先としているノードが存在する確率}) \times \lambda \\ &= \{1 - (\text{自ノードを誰も宛先としていない確率})\} \times \lambda \end{aligned}$$

よって、以下の式で求めることができる。

$$P(A) = \left(1 - \frac{N-2}{N-1} C_1\right) \lambda \quad (6-11)$$

また事象 B は発呼ノード S を宛先ノード D との間で $0 < l \leq r$ を満たすことであるので以下の式でとなる。

$$P(B) = \frac{\pi r^2 D}{N} \quad (6-12)$$

よって確率 P_{fbe} は

$$P_{fbe} = P(A) \times P(B) = \frac{\lambda \pi r^2 D}{N(N-1)} \quad (6-13)$$

で求められる。よって式(6-10)、式(6-13)から以下の式が定まる。

$$P_f = \frac{\mu N(N-1)}{N(N-1)(\mu + \lambda P(1)) + (1 - \lambda) \lambda \pi r^2 D} \quad (6-14)$$

これにより、 P_f は $P(1)$ を用いて求めることができる。

6.3.3 1hop における呼損率の理論解析

呼損率を理論式により算出する。まず、前提として、フィールド外（市外）との通話は考慮していない。ノード S はランダムに宛先ノード D を決定する。発呼率 λ で通話を開始し、通話終了率 μ で通話を終える。hop 数は中継ノードの総数の最大値とする。呼損率はルート構築不可能であった確率となる。よって、 $P(1)$ を 1hop でルート構築可能な確率とおけば、呼損率は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} (\text{呼損率}) &= (\text{ルート構築が不可能な確率}) \\ &= 1 - P(1) \end{aligned} \quad (6-15)$$

これによって、 H_{\max} [hop] でルート構築可能な確率を $P(H_{\max})$ とすれば呼損率は以下の式により求めることができる。

$$(\text{呼損率}) = 1 - \sum_{n=1}^{H_{\max}} P(n) \quad (6-16)$$

前節の 6.3.1, 6.3.2 から次の関係式が得られた。

$$P(1) = \frac{\pi r^2 D}{N} P_f \quad (6-17)$$

$$P_f = \frac{\mu N(N-1)}{N(N-1)(\mu + \lambda P(1)) + (1-\lambda)\lambda \pi r^2 D} \quad (6-18)$$

以上の 2 式について反復計算法を用いることで P_f , $P(1)$ を求める。以下に反復計算法で算出する方法を示す。

- i) 初期値として $P_f = 0$ とする。
- ii) P_f を i に代入して $P(1)$ を求める。
- iii) 求めた $P(1)$ を ii に代入し、 P_f' を求める。
- iv) $P_f \neq P_f'$ ならば $P_f = P_f' + \Delta$ (微小値) とする。
- v) ii, iii を $P_f \cong P_f'$ となるまで繰り返す。
- vi) 最終的に求められた P_f から $P(1)$ を求める。

以上より得られた $P(1)$ を式 (6-15) へ代入することで 1hop の呼損率を求める。

6.3.4 2hop のノード状態遷移図

2hop 時におけるノードの状態遷移図を求める。 $H_{\max} = 2\text{hop}$ である場合にノードは、Free, Busy_Caller, Busy_Callee, Relay の 4 つの状態をとる。以下にそれぞれの状態が変化する際の条件を示す。

【Free のノードの状態変化】

- i) λ で呼を発生して通話可能であれば Busy_Caller となる。

第6章 メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

- ii) 自ノードが呼を発生していないときに着信による通話が可能であれば **Busy_Callee** となる.
- iii) 自ノードが呼を発生していないときに他のノードの中継をすると **Relay** となる.
- iv) i, ii, iiiでない場合は **Free** のままである.

【Busy_Caller のノードの状態変化】

- i) 通話終了率により通話を終了しない場合 **Busy_Caller** のままである.
- ii) 通話終了率から通話終了になると **Free** に戻る.
- iii) 中継中のルートが強制切断により通話を終了してしまう場合に **Free** に戻る.

【Busy_Callee のノードの状態変化】

- i) 通話終了率により通話を終了しない場合 **Busy_Callee** のままである.
- ii) 通話終了率から通話終了になると **Free** に戻る.
- iii) 中継中のルートが強制切断により通話を終了してしまう場合に **Free** に戻る.

【Relay のノードの状態変化】

- i) 通話終了率から通話終了になると **Free** に戻る.
- ii) 中継中のルートが強制切断により通話を終了してしまう場合 **Free** に戻る.
- iii) 中継中に自ノードが λ で呼を発生して通話可能であれば **Busy_Caller** となる.
- iv) 中継中に自ノードにむけて着信があり通話可能であれば **Busy_Callee** となる.
- v) i, ii, iii, ivでない場合は **Relay** のままである.

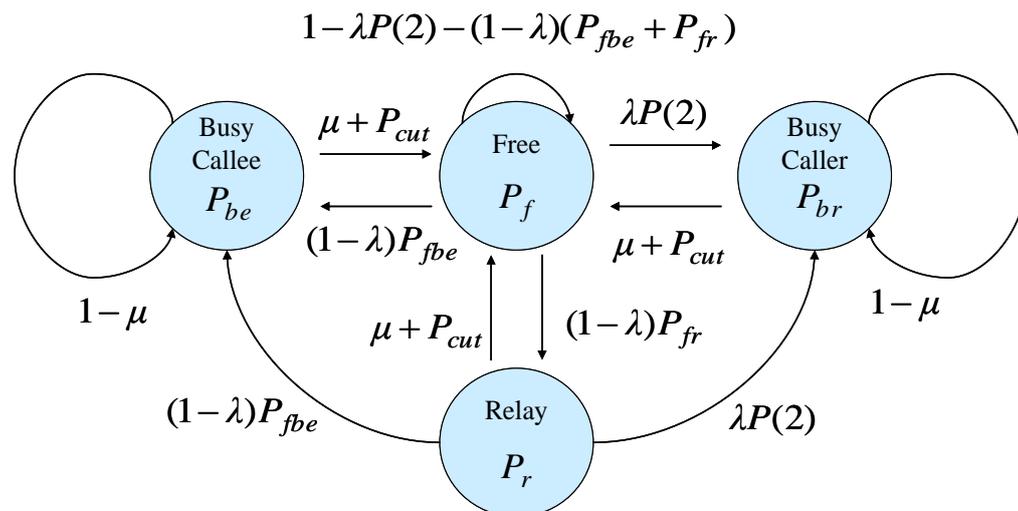


図 6-5: 2hop のノード状態遷移図

第6章 メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

以上の状態変化を考慮してノードの状態遷移図を作成する。図 6-5 は 2hop 時におけるノードの状態遷移図である。 P_{fb_e} は着信により通話する確率である。 P_{fr} は中継ノードになる確率である。 P_{cut} は 2hop の強制切断率である。

6.4 シミュレーション評価

モデルの前提として以下を定義する。

- ◆ 通話中のノードや、既に中継しているノードは、同時に他の中継ノードになることはない。
- ◆ 一度構築されたルートは通話が終了するか、中継ノードが使えなくなるまで使用され続け、切断された場合は再構築しない。
- ◆ 複数のルートがある場合はランダムにルートを決定する。

6.4.1 パラメータ定義及びシミュレーション諸元

本章では、表 6-5 のようにパラメータと確率を定義する。ノードの通信可能最大距離とは 2 つのノードが中継ノードなく通信可能な最大の距離である。

表 6-5: シミュレーションパラメータ

ノード数	100[node]
シミュレーション時間	500000[sec]
各ノードの呼発生率 λ [call/sec]	0.00001-0.003
各ノードの通話終了率 μ	1/180
ノード間通信可能最大距離 r	100-400[m]
シミュレーションフィールドの幅 L	1000[m]
最大ホップ数	1-2hop

6.4.2 理論式とシミュレーション結果及び考察

本章では，モデルの評価方法としては以下の方法を用いた．

- 呼損率 (Call Loss Rate) = 全ノードの発呼数あたりの通信不可能であった呼数の割合
- 強制切断率 (Forced Termination Rate) = 通話を開始したノード数あたりの通話をしていた際にある条件のもとで通話ができなくなったノード数の割合

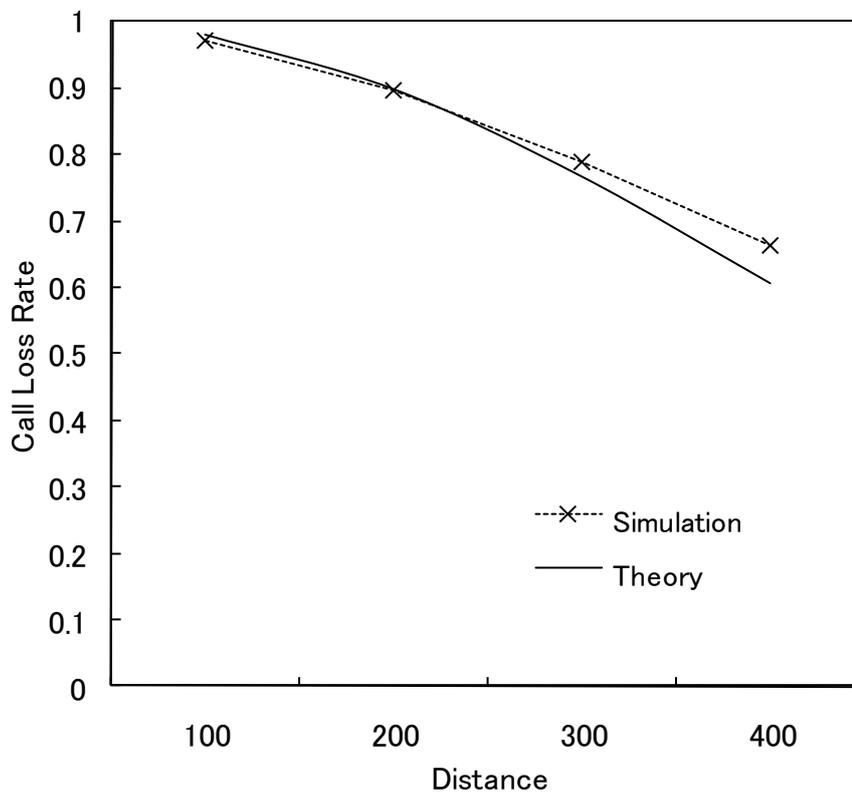


図 6-6: 理論式とシミュレーション結果の比較

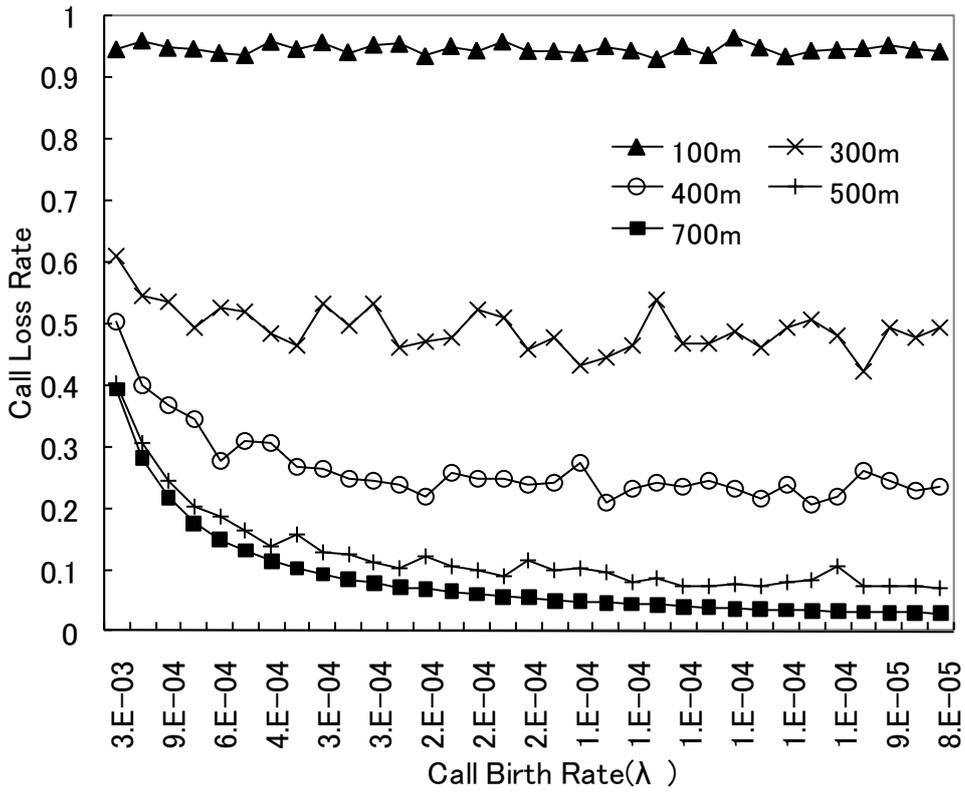


図 6-7: 呼発生率別呼損率

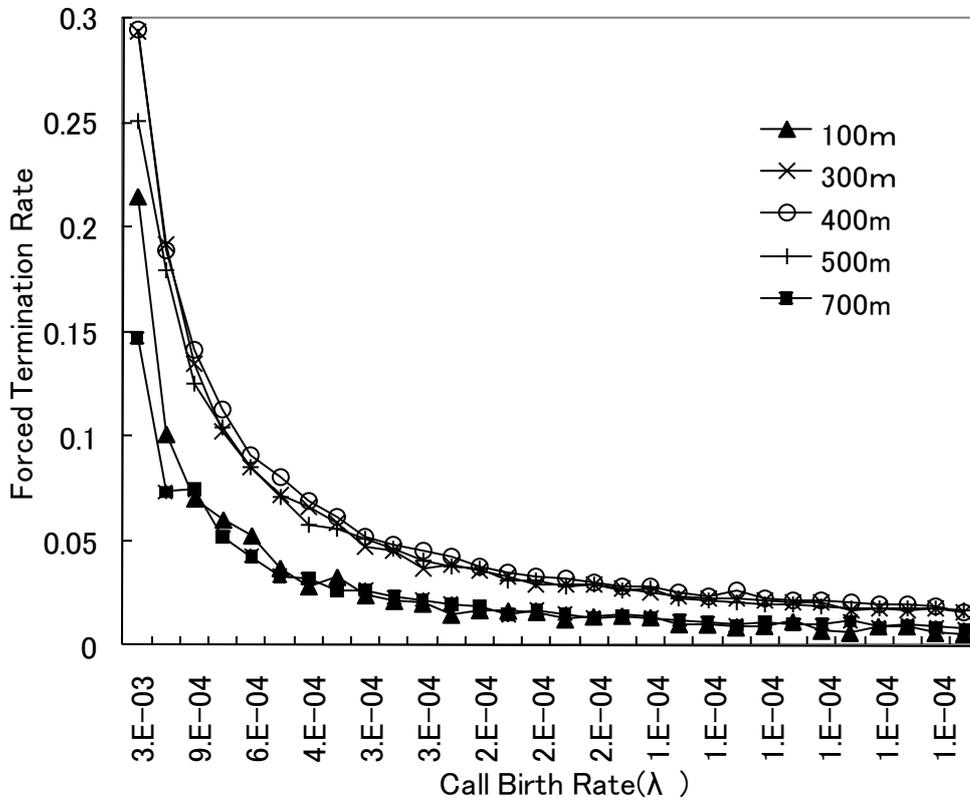


図 6-8: 呼発生率別強制切断率

第6章 メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

図 6-6 は 6.3.3 で求めた理論式と、計算機シミュレーションによる結果を比較したグラフである。1hop で、呼発生率は 0.00001、横軸をノードの通信可能距離として通信可能最大距離を 100m から 400m と増やした際の呼損率を求めた。結果として、理論式も計算機シミュレーションもノード通信可能距離が増えれば呼損率が減少することがわかる。また理論式と計算機シミュレーションの結果が一致することから、理論式と計算機シミュレーションの整合性が示された。

図 6-7 は最大ホップ数を 2hop として呼損率を計算機シミュレーションにより求めたグラフである。パラメータとして呼発生率を 0.00009-0.002 と変化させて、ノードの通信可能最大距離を 100m, 300m, 500m, 700m とした。グラフからノードの通信最大距離を伸ばすことで呼損率が減少することがわかるが呼発生率が増えることで呼損率が悪化してしまうことも示された。

図 6-8 は最大ホップ数を 2hop として強制切断率を計算機シミュレーションにより求めたグラフである。パラメータとして、呼発生率を 0.00009-0.002 と変化させた。そして、通信可能最大距離を 100m, 300m, 500m, 700m とした場合の強制切断率である。このグラフからノードの通信可能最大距離が伸びると強制切断率が増加してしまうことがうかがえる。これはノードの通信距離を増やすことにより中継ノードとなれるノード数が増加してしまうことで強制切断が起りやすくなるからだと考えられる。同時に呼発生率が増えたとやはり強制切断率も悪化する。しかし、通信可能最大距離が伸びることで強制切断が生じやすくなることがわかるが、ノード通信最大可能距離が 700m である場合は 100m である場合と結果が同じになる。これは図 6-7 からもわかるように呼損率が少なく通信可能距離が長いために 1hop で直接通信ができるようになり、強制切断が起りにくくなるからであると考えられる。

6.5 むすび

本章では、交換局を介さず、家庭用固定無線端末でマルチホップを用いて通話を行うモデルを提案した。これは家庭用固定無線端末のシステムとマルチホップ技術を融合して、交換局といったアクセスポイントを介さなくても、通話を行うことを可能とするモデルである。直接通信できない場合は近くのノードを中継ノードとして利用することで通話を行う。マルチホップを用いて家庭にある無線端末のみで簡易にネットワークを構築することで、交換局の負荷を軽減し、無料通話サービスが実現可能となる。また交換局が災害等で通信不可能となった際に、固定無線端末さえあれば、通話を行えるので有効的なモデルである。このモデルについて理論解析を行い、計算機シミュレーションによりモデルの性能評価を試みた。

モデルの特性を評価するために、モデルの呼損率を算出する理論式を導き、計算機シミュレーションと併せて呼損率の評価を行った。その結果、理論式と計算機シミュレーショ

第6章 メトロポリタンエリアでのマルチホップネットワークの適用

ンの結果の値が一致したことにより相互の整合性を証明した。

同時に強制切断率についてもシミュレーションを行った結果、ノードの通信可能最大距離が伸びれば呼損率が減少することが示されたが、強制切断率が悪化してしまうことも示された。また呼発生率の増加に伴い呼損率が悪化してしまい、強制切断率も頻繁に生じることも明らかとなった。ノードの通信可能最大距離をさらに伸ばすことで、強制切断率が改善することも示された。これは 1hop による通信が可能となりやすくなることで呼損率が減少するからだと考えられる。

つまり、強制切断が生じないためには hop 数の少ないルートを構築する必要があり、そのためには通信電力を上げて通信可能距離を伸ばすことが効果的である。ただし、エネルギー資源の有効利用を考えた場合、ネットワーク効率の優れたルート構築方法を検討する必要もある。例えば、強制切断を軽減するためには各無線端末が回線使用率を保持しておく、この頻度によってネットワークを構築する際のアクセス方式を適宜変化させることも、ネットワークの性能向上といった面で有効である。

第7章

広域エリアでのマルチホップ ネットワークの適用

7.1 まえがき

阪神・淡路大震災や新潟中越沖地震、スマトラ沖地震のような大規模震災時には、通信回線の切断、停電に伴う基地局や交換機等通信設備への電源供給の停止など、既存の通信インフラが広い範囲で使用不可能となることが予想される。新潟中越沖地震では実際に100近くの基地局が倒壊及び停電によって使用できなくなった。また、予備の蓄電池で動作していた基地局周辺の携帯電話が使用可能な地域でも通話規制が行われるなど通話やメールが極端に繋がりにくい状態に陥った。これらのように災害復興時に、被災者が被災地域外部との情報交換を行えないなどといった問題が生じてしまう[52]。

そこで本章では長距離通信が可能な HF 帯の電波を利用することで既存の通信インフラが使用できなくなった際に、それらに代わり簡易的に構築可能な広域 HF 帯マルチホップネットワークを提案する[41][42]。本モデルを用いれば被災地における状況把握、情報提供、連絡手段の確保が可能になる。HF 帯の電波に対応した簡易なトランシーバーさえあれば通信ネットワークを簡単かつ即座に築くことができる。また災害直後の救助要請を行うことができ、被災地間通信や更には被災地外との通信も行うことができる。都市部はもとより、離島や山間部、過疎地において更に大きな効果を発揮するものと考えられる。

HF 帯の電波は長年にわたり地上波及び電離層反射波を使用することで長距離無線通信に活用されてきた。電離層反射波は地球の上空にあるイオン化された電離層内で、電子密度の違いから電波が屈折し再び地上に戻ってくる。この伝搬様式では数千 km 離れた地点まで電波が到達するため、他の周波数帯電波を使用した通信システムと比較すると、基地局などの中継局の設置数が少なくても広域に電波が到達する。この周波数帯の電波は、見通し内環境はもとより見通し外環境においても適切な使用周波数を選択することで漁業用、軍事用、国際ラジオ放送、アマチュア無線等の用途で幅広く利用されている[22][23]。

また、HF 帯を用いることにより低電力で簡易かつ低コストのシステムを構築でき伝搬距離も長いと、情報化の遅れている国々にも比較的導入しやすいものとする。また、このシステムを導入することで地震によって生じる津波の発生情報なども遠隔地まで送り

届けることができる。

ただし、電離層の状態は昼夜で変化する太陽光、太陽黒点周期などの太陽活動や、地球上における磁気変化の影響を受け複雑に変化する。この変化が電離層反射波の伝搬特性にも影響を及ぼす。また、短波を利用した通信の問題点として、地上波の最大到達距離から電離層反射波の最短跳躍距離の間に、電波の届かない不感地帯であるスキップゾーンが生じてしまうということがあげられる。そこで、アンテナに給電する電流の位相を変えることで電波の送信仰角を制御することが可能なフェーズドアレーアンテナを用い、スキップゾーンの縮小を図る。このアンテナを使用することにより電波の送受信時に高利得を得て、電離層反射波の跳躍距離を変動させることも可能になる。更に指向性が鋭くなることで混信の回避やパケットの衝突の減少も期待できる。ただし、フェーズドアレーアンテナを用いアンテナの仰角方向の指向性を制御することで、通信距離が変化しスキップゾーンは縮小するが、完全にこの問題を解消することはできない。そこで、局に中継機能を付加して経路を自律的に構築するマルチホップネットワークを適用することで、スキップゾーンの補完を図る。本章では図 7-1 のように、広域に及ぶ全ての局に災害情報を送り届けることが可能な「広域 HF 帯マルチホップ通信モデル」を提案する。

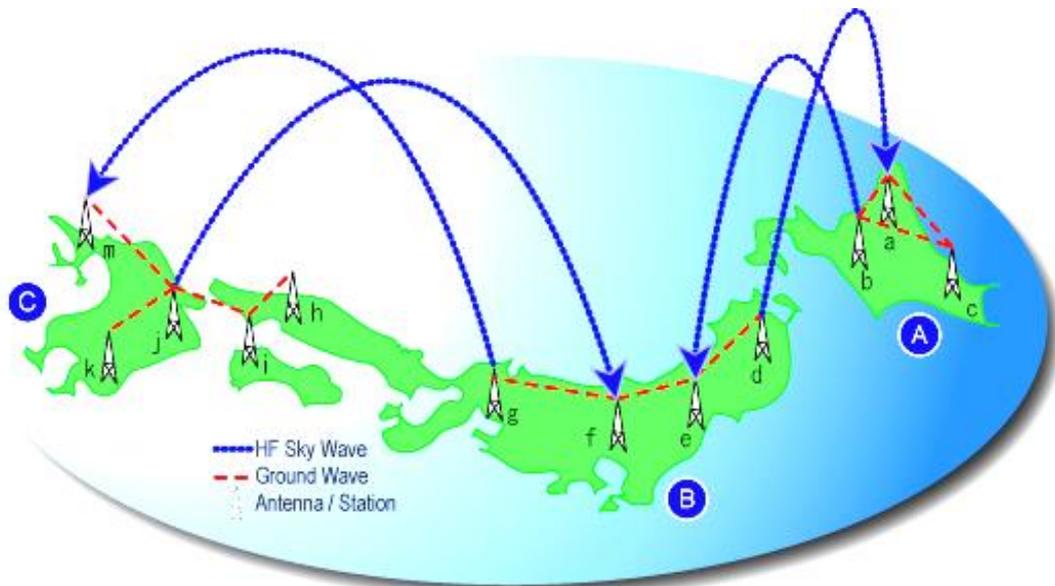


図 7-1: 広域 HF 帯マルチホップ通信モデル

7.2 HF 帯を用いた広域マルチホップネットワーク

本モデルは、緊急時における災害情報を被害エリアにある全局に限らず伝えることを目的とする。フェーズドアレーアンテナを用いた HF 帯通信を行い、広域エリアに複数局が配置されていることを想定した際の、広域 HF 帯マルチホップネットワークの実験および性能評価を行う。以降、マルチホップネットワークで用いられる端末を局と呼ぶ。提案システムでは、フェーズドアレーアンテナの位相制御を行い局間にマルチホップ通信を適用することで、HF 帯電波伝搬の問題点であるスキップゾーンの補完を図る。

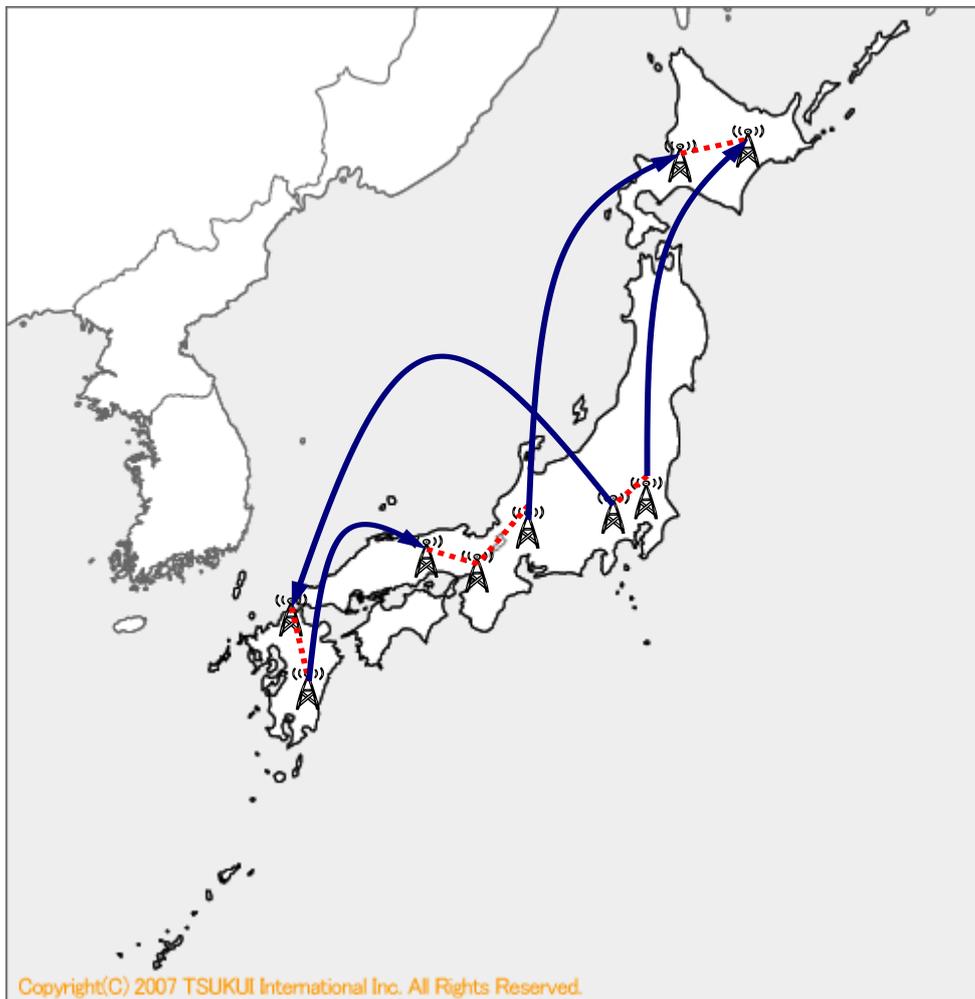


図 7-2: HF 帯マルチホップ通信モデル概略図

(Copyright©2007 TSUKUMI International Inc. All Rights Reserved)

図 7-2 は HF 帯マルチホップ通信モデルの概略を示した図である。短波では電離層反射波の使用により数千 km に及ぶ長距離通信を送受信端末間で直接行うことができる。しか

し、スキップゾーンと呼ばれる電波の到達しないエリアが存在し、そのエリア内にある端末へは情報を送り届けることができない。そこで図 7-2 の実線で示す電離層反射波と点線で示す地表波を効率よく組み合わせ、マルチホップを使用してネットワークを構築すれば緊急情報などを広域に送り届けることが可能となる。そこで、HF 帯用フェーズドアレイアンテナ適用による更なる中継効率の改善について検討を行う。

7.2.1 モデルの概要

提案するシステムの簡略構成を示す。図 7-3 に示すように、局 A について地表波が届く影のかかった円内のエリアと、電離層反射波が届くドーナツ型の斜線のエリアとの間にはスキップゾーンと呼ばれる電波の届かないエリアが生じる。局 B、D は局 A のスキップゾーンに存在するため局 A からのパケットを受信することができない。提案モデルのマルチホップ機能を用いて局 C が局 A からのパケットを中継することで、局 B、D ともパケットを受信することが可能となる。このように、HF 帯電波伝搬の特性問題に対してマルチホップの利点を融合させ解決を図る。本モデルでは局 A から局 C までの経路を 1hop とし、局 A から局 C、局 C から局 B までの経路を 2hop と呼ぶ。

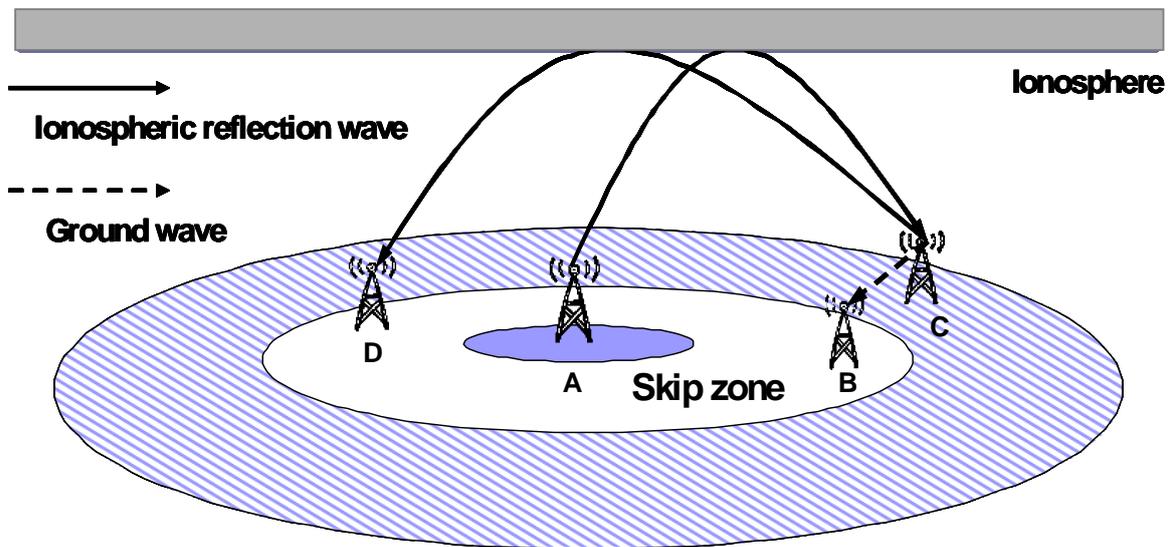


図 7-3: マルチホップネットワーク適用例

7.2.2 電離層反射波による伝搬

図 7-4 に示すように、電波の伝搬モードには大きく分けて地上波と空間波がある。地上波は地球の表面に沿って伝搬する地表波と見通し距離内を伝搬する直接波、大地で反射し

第7章 広域エリアでのマルチホップネットワークの適用

て伝搬する地上反射波からなっている。空間波は電離層で反射して伝搬する電離層反射波である[20][21]。次に電波の種類と性質を紹介する。

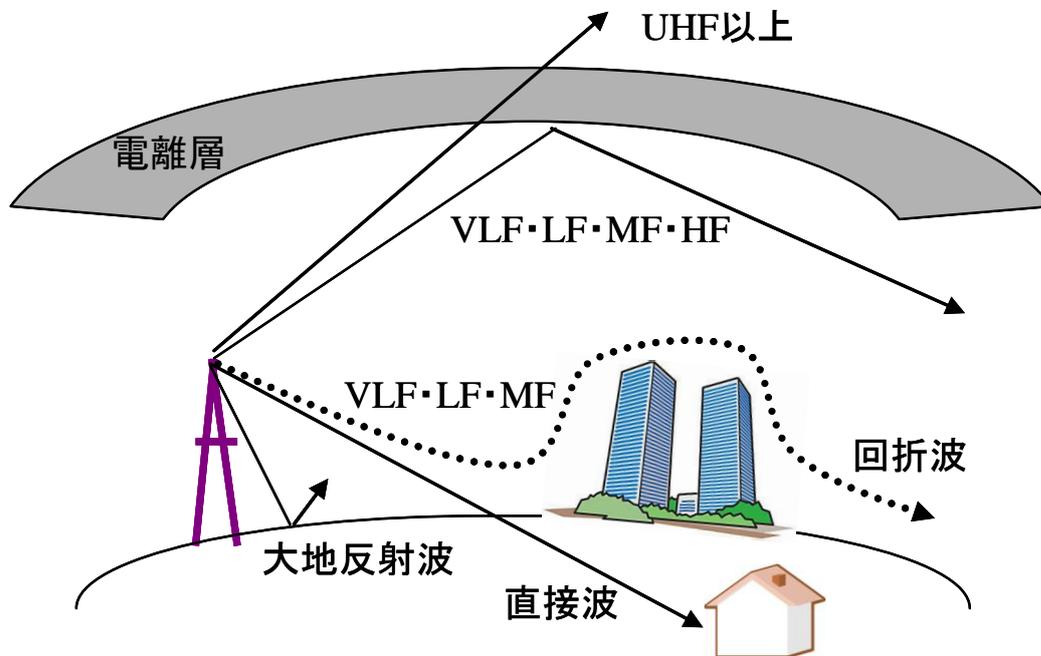


図 7-4: 電波伝搬

◆ 地上波

地上波は大地と大気の影響を受けながら伝搬する電波のことである。地上波はさらに地表波、直接波、大地反射波、山岳回折波などに分類される[22]。

◆ 地表波

地上にある送信アンテナから電波が放射された場合、放射された電磁界によって大地に電流が流れ、大地近傍に新たな電磁界が発生する。このようにして発生した電磁界は、地表の影響を受けながら、地表に沿って伝搬していく[22]。これを地表波といい、伝搬特性は放射された電波の周波数、偏波の種類、大地の伝導率に強く依存する[23]。

◆ 直接波

送信アンテナから空間に放射される電波は直進する電波と、大地で反射して伝搬する電波からなる。受信点が送信点からの見通し内距離にあるとき、これらの合成された電波が受信点に到達する。

◆ 電離層反射波

短波を用いた通信において、ある条件のもと上空に放射された電波は、地球の上空に存在する電離層に反射して再び地上に戻ってくる。電離層は図 7-5 に示すように D 層、E 層、F 層がある[22]。ただし朝昼晩といった時間帯などによって反射する周波数帯域が異なる。

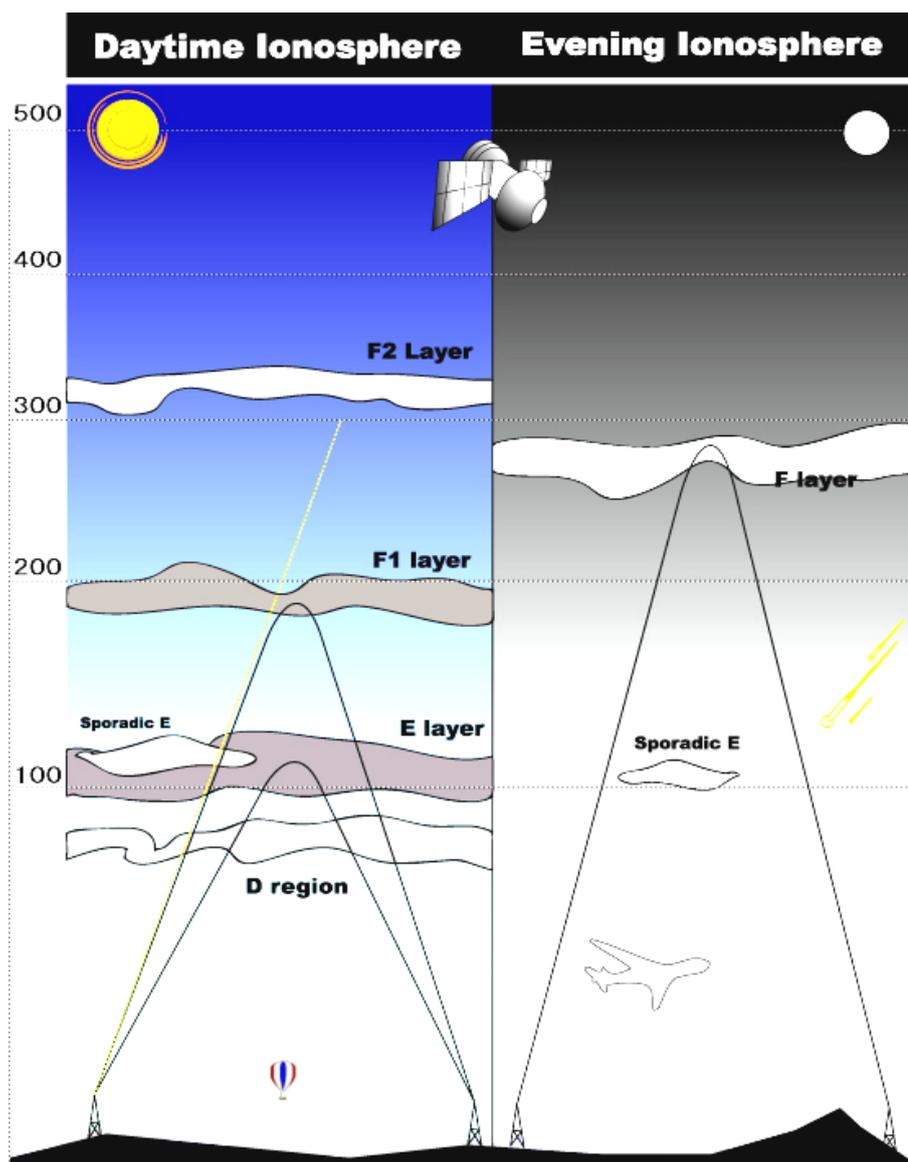


図 7-5: 電離層の状況

◆ 電離層と電波の反射

地球の上空は対流圏と電離層から構成されている。対流圏は地上から約 15km までのイオン化されていない層で、電離層はおおよそ高度 50km から 6000km までの範囲に

第7章 広域エリアでのマルチホップネットワークの適用

分布しているイオン化されている層である。電離層反射波の性質として、図 7-6 に示すように短波 (HF: 3MHz~30MHz) は約 300km の高度に形成される電離層の F 層に反射して地表との反射を繰り返しながら地球の裏側まで伝わっていく性質がある。長距離の通信が簡単に行えることから、現在でも遠洋の船舶通信、国際航空機用の通信、アマチュア無線に広く利用されており、今後も需要が伸びていくとされる。中波 (MF: 300kHz~3MHz) は電離層の E 層に反射し遠距離通信が可能で、電波の伝わり方が安定しているため遠距離まで届く。主にラジオに用いられている。ただし地球の裏側にまで到達することはない。超長波 (VLF: 3kHz~30kHz) や長波 (LF: 30kHz~300kHz) は電離層の D 層に反射し遠くまで伝わるることができる。このように電離層反射波を用いることで広域通信が可能となる。しかし、図 7-6 のアンテナから送信される地上波の最大到達ポイントと電離層反射波の最小到達ポイントとの間にある斜線で示されたエリアは、電波が届かないといった現象が生じてしまう。このエリアがスキップゾーンである。

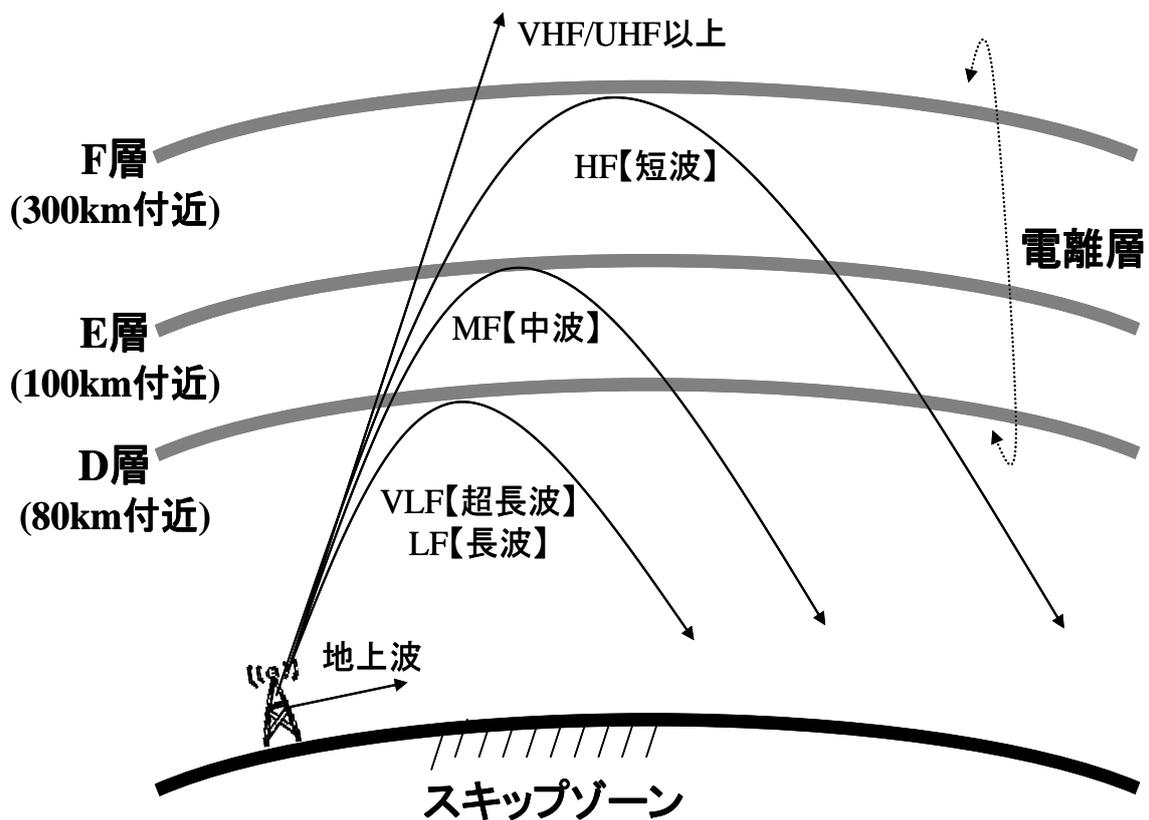


図 7-6: 電離層反射

また D 層は日中 50km から 90km の高さに発生し、太陽による光電イオン化によって発生する層である。この層の電子密度は $10^{10} \sim 10^{11}$ 個/ m^3 であり、LF 波帯の上部から MF 波帯の電波を吸収し、VLF 波帯の電波を散乱させる。ただし、夜間には太陽光

がなくなり、光電イオン化も起こらなくなるため消滅する。E層は太陽からの放射線、紫外線、X線、宇宙線、流星などにより高度90kmから140kmに発生し、夜間にはMF波帯の電波を反射させる。日中この層はHF波帯の電波を減衰させる。F層はさらにF1層とF2層と呼ばれる2層からなっている。F1層は地上からの高度約175kmから220kmに存在し、F2層は約200kmから400kmに存在しており、夜間は1つの層に統合される。この層はHF帯の電波を用いた長距離通信に利用される。

◆ 電離層反射波の伝搬様式

低い周波数帯の電波をある送信点から電離層に向かって垂直方向に放射すると、この電波は電離層で反射して電波の送信点へ再び戻ってくる。この放射する電波の周波数を低い周波数から高い周波数へ移行していった場合、ある周波数より高くなると、いずれ電波は電離層を透過し反射しなくなる。この周波数を臨界周波数という。

図7-7は地球の表面を平面に近似して地表の送受信点と電離層、電離層反射波の伝搬経路を模式的に示したものである。この図において局Aが送信局、B、C、Dが受信局である。局Aから仰角 i_A で送信された電波は電離層を突き抜けてしまうが、仰角を徐々に低くしていくと電波が再び地表に戻ってくる[22]。さらに仰角を $i_B \sim i_D$ へ変化させるにつれ電離層反射波の跳躍距離は長くなる。

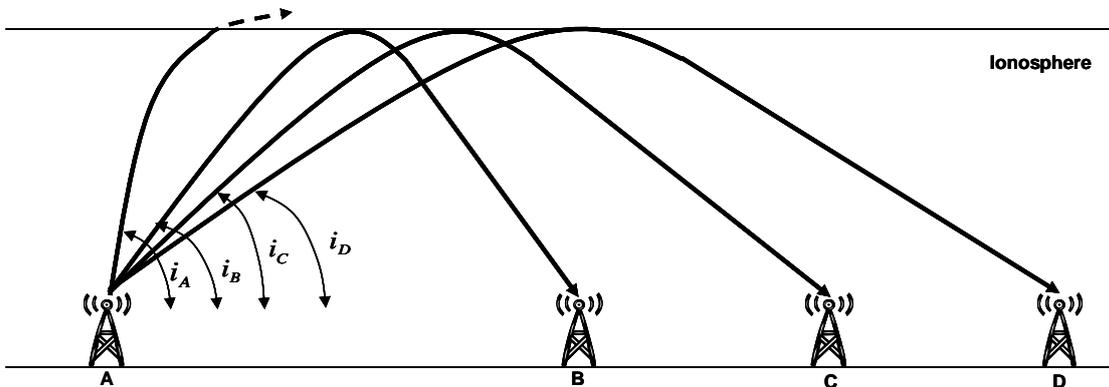


図 7-7: 送信仰角変化に伴う跳躍距離の変動

7.2.3 情報パケット転送アルゴリズム

提案する広域 HF 帯マルチホップ通信ネットワークを用いて、情報パケット転送する際のアルゴリズムと、情報パケット送信について具体的な流れを示す。

1. 各局はパケット発生率 λ のポワソン分布にしたがい以下の情報パケットを作成しブロードキャスト送信する。

送信元の局ID	hop数(パケット転送回数)	Intvalslot(パケットの生存slot数)	災害などの情報
---------	----------------	--------------------------	---------

第7章 広域エリアでのマルチホップネットワークの適用

2. 情報パケットを受信した局は、パケットの送信元の局アドレスと hop 数を確認して、次のケースごとに対応する。

- 【Case1】 受信したパケットが初めて受信したパケットであり、パケットの hop 数とパケット生存 slot 数が制限を越えていない場合
→ 送信元の局アドレスと情報を保管し、転送 slot 数をランダムに決定し、以下のパケットを作成し、ブロードキャスト転送する。

送信元の局ID	(受信した際の)hop数+1hop	(受信した際の)Intvslot-転送slot	災害などの情報
---------	-------------------	-------------------------	---------

- 【Case2】 受信したパケットが初めて受信したパケットであるが、パケットの hop 数とパケット生存 slot 数が制限を超えている場合
→ 送信元の局アドレスと情報を保管する。

- 【Case3】 以前にも同じ局から同じ情報のパケットを受け取っていた場合
→ 何もしない。

本モデルの前提として、情報パケット送信用のチャンネル数は1チャンネルとし、同タイミングで2つ以上の情報パケットを受信した場合は衝突とみなす。

7.2.4 送信タイミング選択モデルの提案

情報パケット送信に対して単にマルチホップ通信を用いて行くと、フラddingによりパケット衝突が頻繁に生じてしまう。そこで中継局が情報パケットを受信した際の受信電力にもとづいて、パケットを転送するタイミングを選択するモデルを考案し、HF 帯マルチホップ通信モデルへ導入することで、パケット衝突回避を図る。

従来のマルチホップモデルではパケットを受信した際、即座に転送モードに入り、任意の ShiftSlot 以内でランダム値を決定し、ランダム値後にパケットを転送していた。本モデルではまず、短波の地表波と電離層反射波とが届くエリアをパケット受信電力の値ごとに、図 7-8 のように3つのエリアに分ける。そこで受信電力の値をもとに Level 値を設定し、その Level 値に応じてフラddingの転送モードに入るタイミングを TimeShift だけ遅らせる。このモデルを「送信タイミング選択モデル」として提案する。TimeShift は以下の式で求める。

$$TimeShift = ShiftSlot \times level \quad (7-1)$$

具体的には図 7-8 で示すように、局 S から送信された情報パケットを受信した局 D は受信電力をもとにパケットの Level を 2 に設定する。ここで、ShiftSlot を 10slot とした場合、TimeShift は 20slot となり、20slot 後に転送モードに入る。転送モードに入ると従来同様に ShiftSlot 以内のランダム値を決定しパケットの転送を行う。このように、転

送タイミングを受信電力値のレベルに応じて変化させることでパケット衝突を低減し、スキップゾーンや遠距離にある局にも即座にパケットを送信することが可能となる。

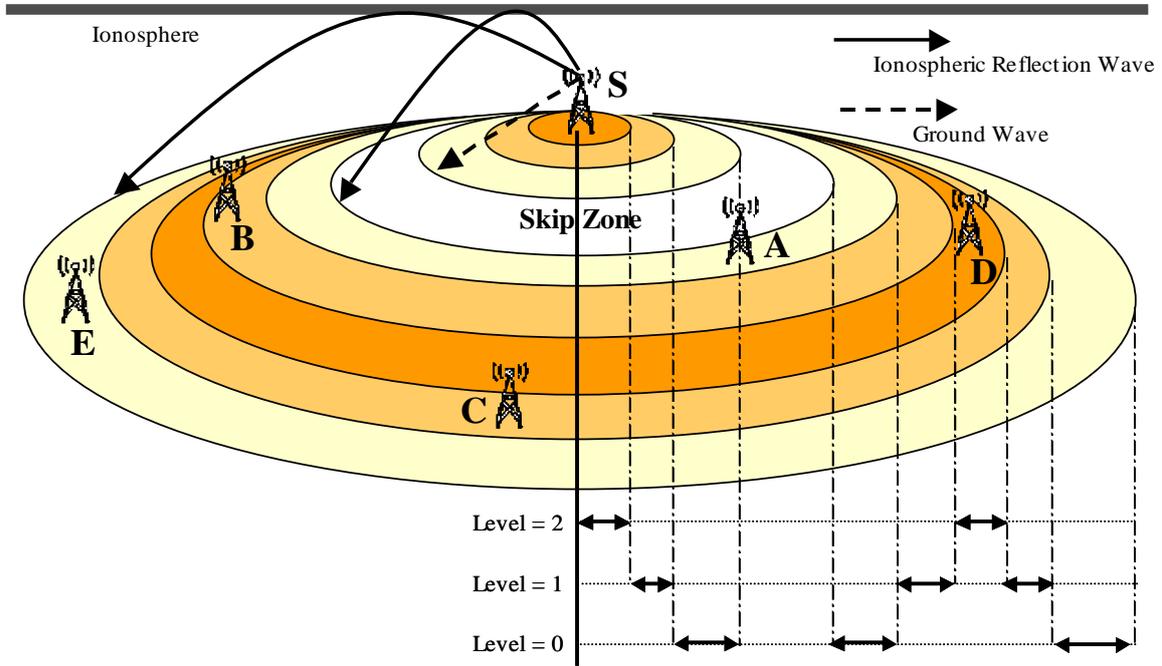


図 7-8: 送信タイミング選択モデルの概要

7.3 HF 帯アレーアンテナ

同じ特性を持つ複数のアンテナの配列により構成されるアンテナシステムをアレーアンテナという。これにより、アンテナの指向性を鋭くして高利得を得ることができる [43][44][49]。

7.3.1 受信アンテナの利得と受信電力

到来電波（放射電界）の中にアンテナの給電点を開放しておくと、アンテナの特性や到来電波強度に応じて電圧 V_0 がアンテナ端子に誘導される。このアンテナ端子に任意の負荷 Z_t を接続すると電流 I が流れ、それに対する端子電圧 V_t が発生する。この場合の電磁界の状態を考えてみると、到来電波中でアンテナ端子が開放された場合の電磁界と、 ZI に等しい電圧 V を負荷した送信アンテナの電磁界であると考えられる。ここで Z はこのアンテナを送信アンテナとして使った場合の入力インピーダンスである。これより次式が得られる [26]。

$$V_0 - V = V_t = Z_t I \tag{7-2}$$

これが受信アンテナを端子からみた場合の一般的な関係式であり、負荷に流れる電流は

$$I = \frac{V_0}{Z + Z_l} \quad (7-3)$$

で与えられる。

したがって、受信開放電圧 V_0 は到来電波には関係するが、負荷 Z_l には無関係である。すなわち、受信アンテナは起電力 V_0 、内部インピーダンス Z の電源と等価になる。

次に、受信アンテナの利得について考えるため、受信最大有効電力（アンテナから取り出さうる最大電力）を W_a とすると、式 (7-3) から分かるように Z_l が Z の複素共役数となる共役整合の時、負荷電力が最大となることから、 W_a は次式で与えられる [50][51]。

$$W_a = R \left| \frac{V_0}{2R} \right|^2 = \frac{|V_0|^2}{4R} \quad (7-4)$$

R は Z の実数部、すなわちアンテナの入力抵抗である。上式で与えられる W_a はアンテナを到来電波中に置いた際に、負荷に取り出さうる最大の電力であり、受信アンテナの利得はこの値に比例するように定義される。半波長アンテナを基準として周波数で表すと次式のようなになる。

$$W_a = 31.15 \frac{G_h}{f_m^2} |E|^2 \text{ [W]} \quad (7-5)$$

ここで、 f_m は周波数 [MHz]、 E は電界強度 [V/m]、 G_h は完全半波長アンテナを基準とした利得 [dB] である。

7.3.2 アンテナの可逆性

あるアンテナを送信アンテナとして使用した場合と、受信アンテナとして利用した場合についてその諸特性を比較すると、入力インピーダンスは共通である。また、利得および指向性についてもそれぞれ同じになる [27]。この関係はさまざまな媒質が混在する空間においても、また損失のある大地や反射板などが存在する環境でも成立する。

しかし、アンテナを送信アンテナとして使用した場合の電流分布の形は、そのアンテナを受信アンテナとして使用した場合の電流分布の形と同一にはならず、アンテナ上の電流分布については一般的に可逆の関係性は成り立たない。

7.3.3 アンテナの電界強度

図 7-9 のように、直交座標系の原点に半波ダイポールアンテナ 1 を置き、原点から Z 軸に沿って d だけ離れたところに半波ダイポールアンテナ 2 を置いた場合を考える。下段のアンテナから距離 r における点の合成電界 E は、ダイポールアンテナを流れる電流の最大振幅を I_0 とした時

$$E = 60I_0 \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} (1 + e^{jkd \cos \theta}) \quad (7-6)$$

となる[22]. 上式の指向性関数を2つの項に分け $D_1(\theta)$, $D_2(\theta)$ とすると

$$D_1(\theta) \equiv \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \quad (7-7)$$

$$D_2(\theta) \equiv 1 + e^{jkd \cos \theta} \quad (7-8)$$

となる. よって $D(\theta)$ は

$$D(\theta) \equiv D_1(\theta)D_2(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} (1 + e^{jkd \cos \theta}) \quad (7-9)$$

となる. 中央の式はパターン乗積の理または指向性合成の理と呼ばれるものである. 上式の $D_1(\theta)$ はアンテナ固有の指向性係数, $D_2(\theta)$ はアンテナ配列による指向性係数で, これを配列係数という.

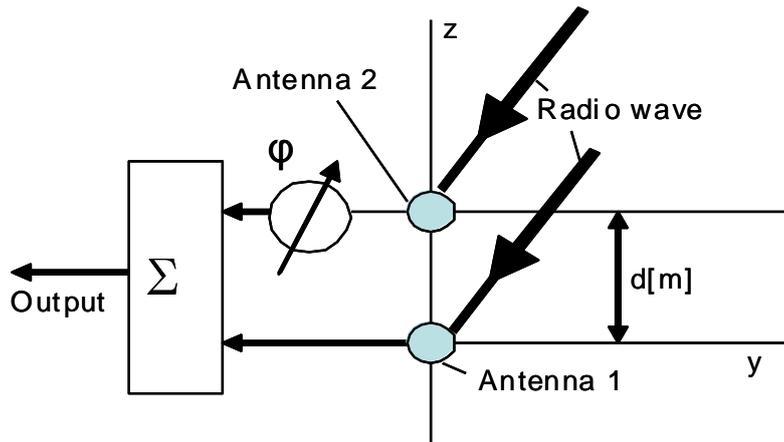


図 7-9: フェーズドアレーアンテナの構成

図 7-9 は今回の計測実験で使用した HF 帯用フェーズドアレーアンテナの簡単な構成を示した図である. 受信時には, 両アンテナで別々に受信した電波を加算器で合成し出力する. 片方のアンテナから加算器へ信号を送る途中に移相器を挿入し位相を遅らせてから合成することでアンテナの指向性を変化させる. 2 個の受信アンテナから成るアレーアンテナについて, 1 つの受信アンテナの位相が γ 遅れている場合の配列係数 $D_2(\theta)$ は下式のようになる.

$$D_2(\theta) = \frac{1 - e^{2j\phi'}}{1 - e^{j\phi'}} = \frac{\sin \phi'}{\sin \frac{\phi'}{2}} e^{j\frac{\phi'}{2}} \quad (7-10)$$

ここで $\phi' = -\gamma + kd \cos \theta$ である.

7.4 電離層反射波の受信実験

フェーズドアレーアンテナを用いた HF 帯通信について電離層反射波の特性を実験により測定する.

7.4.1 実験用 HF 帯フェーズドアレーアンテナの構成

HF 帯用フェーズドアレーアンテナは, 直交座標系の原点に半波長ダイポールアンテナ 1 を置き, 原点から Z 軸に沿って d だけ離れたところにアンテナ 1 と同じ形式の半波長ダイポールアンテナ 2 をおいた. 受信時には両アンテナで別々に受信した電波を加算器 Σ で合成し出力する[27]. 片方のアンテナから加算器へ信号を送る途中に移相器を投入し位相を遅らせてから合成することでアンテナの指向性を変化させる[44][45]. HF 帯通信においてフェーズドアレーアンテナを用い仰角指向性を変化させることで, 電離層反射波の通信距離を操作できる. これにより電離層反射波を効果的に利用でき, スキップゾーンが縮小し通信エリアの拡大が図れる.

本研究実験では複数のアンテナ素子とそれに給電する電流の位相を変化させるための移相器でフェーズドアレーアンテナを作成し, 受信電力の測定を行った.

7.4.2 実験環境

本実験ではアンテナの指向性を変えた各パターンについて電離層反射波の受信電力を計測評価する. 図 7-10 は実験に使用した受信局のアンテナである. アンテナは東京の西早稲田に設置し, 地上高を 10m, 22m とした 2 本の半波長ダイポールアンテナによるアレーアンテナを用いた. 1 本のアンテナで受信する際は地上高 16m に設置した半波長ダイポールアンテナを用いた. 半波長ダイポールアンテナの仕様は表 7-1 に示す.

アレーアンテナでは地上高 10m のエレメントに給電する電流の位相を基準値 0 とし, 地上高 22m にあるエレメントに給電する電力の位相を移相器で -150° , -120° , -90° , -60° , -30° , 0° と変えて計測した. 両アンテナに給電する電流の位相差が少ないとき, アレーアンテナの指向性は低い仰角方向に強く現れ, 位相差が大きくなるにつれアンテナの指向性が強く現れ仰角も高くなっていく. フェーズドアレーアンテナを適用した HF 帯電波伝搬の計測実験における各種パラメータを表 7-2 に示す. 図 7-11 は 40 日間の平均臨界周波数の日周変化をまとめてグラフにしたものである[46]. この図から, 本研究で実験を行う時間帯として, 臨界周波数が緯度の違いによる変動の差が少なく比較的安定している時間帯を考慮して, 7MHz 帯は 19 時から 23 時まで, 14MHz 帯は 8 時から 13 時まで焦点をおいて実験を行った. この時間帯の電離層高度を求めた結果, 7MHz の電離層高度はおよそ 200km, 14MHz は 250km である.



図 7-10: 実験用アンテナ

表 7-1: 半波長ダイポールアンテナの仕様

周波数	7MHz, 14MHz
インピーダンス	50Ω
エレメント長	11.6m

表 7-2: 計測実験における各種パラメータ

周波数[MHz]	7	14
2 地点間距離[km]	430-3730	430-6970
アンテナ高[m]	10, 22 (2 本使用時)	
	16 (1 本使用時)	
サンプリング数	1000	
サンプリング間隔[sec]	0.1	

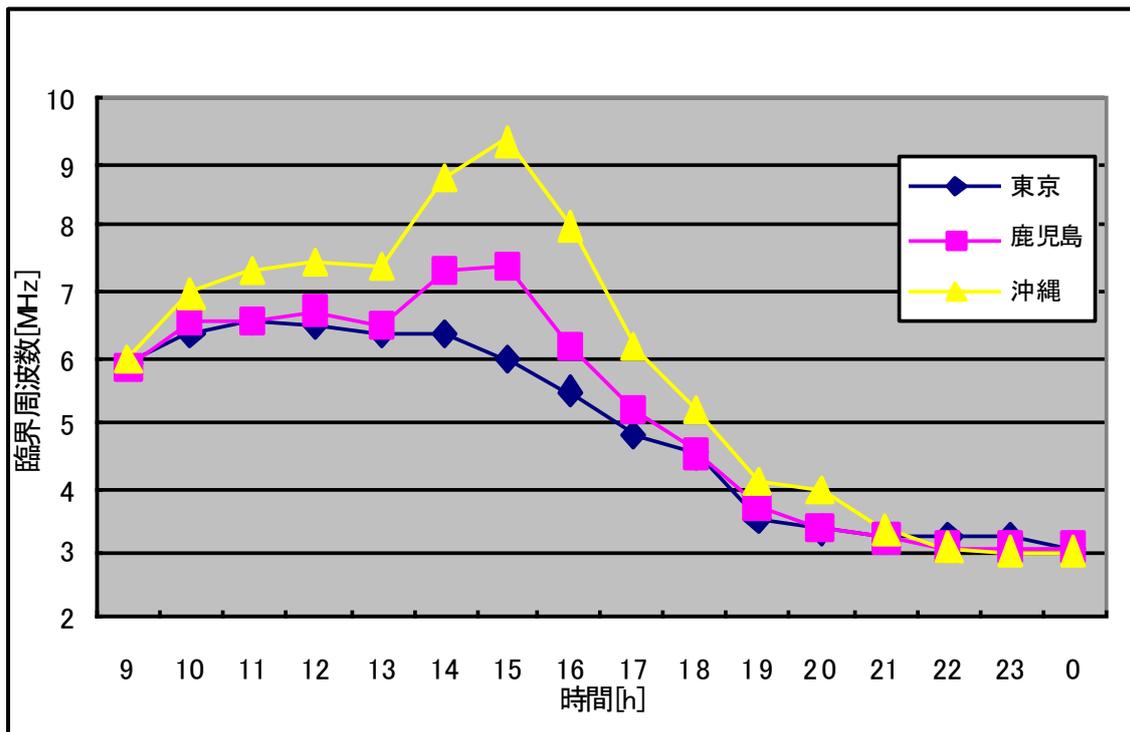


図 7-11: 臨界周波数の日周変化

実験の使用周波数は 7MHz と 14MHz である. 2 地点間距離は表 7-3, 表 7-4 に示す各値で行った. 伝搬距離と電離層高度による仰角及び電離層入射角の間に以下の式が成り立つ[27].

$$\sec(i_0) = \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2h'}\right)^2} \quad (7-11)$$

$\sec(i_0) = 1 / \cos(i_0)$ であり, i_0 は電離層への電波の入射角, h' は電離層高度, D は2地点間の距離を表している. 以上の2地点間距離及び電離層高度の値から仰角を算出する.

表 7-3: 7MHz の実験結果

7MHz	2 地点間距離[km]	送信出力[kW]	仰角[deg.]
兵庫	430	0.1	43.4
韓国	1130	250	16.98
中国	1690	150	9.15
ベトナム	3730	100	5.81

表 7-4: 14MHz の実験結果

14MHz	2 地点間距離[km]	送信出力[kW]	仰角[deg.]
兵庫	430	0.1	43.4
韓国	1130	250	16.98
グアム	2530	100	10.94
タイ	4590	250	6.62
ベトナム	6970	500	4.11

7.4.3 実測による性能評価

表 7-5, 表 7-6 は 7MHz, 14MHz それぞれの受信電力値 dBm をまとめたものである。上段の度数表示されている数値は 2 つのエレメントに給電する電力位相差を表している。下段の数値はアンテナの指向性の強く現れる仰角を表している。指向性を制御することで受信電力値も変化している様子がわかる[46]。

図 7-12, 図 7-13 は, 計測データをもとに 7MHz, 14MHz でアンテナ 1 本 1 element, アンテナ 2 本で位相差なし 2 element(Same phase), アンテナ 2 本で位相差あり 2 element(Phase control)における, それぞれの伝搬による減衰特性をグラフ化したものである。図 7-12, 図 7-13 より, 給電位相を操作するアレーアンテナを使用することで伝搬損が減少することがわかる。指向性制御による受信電力の改善はアンテナ 1 本使用した時と比較して 3.7~10.1dB であった。表 7-7, 表 7-8 に図 7-12 と図 7-13 の減衰特性を用いて送信局の送信電力を仮定した場合における HF 帯電離層反射波の通信距離推定値を示したグラフである。図 7-12 と図 7-13 の減衰特性の各値にそれぞれの送信電力値を加えて描かれるグラフと, 所要電力閾値との交点を求めることにより跳躍・最長通信距離とした。跳躍距離とは電離層反射波が届く最短距離を, 最長通信距離とは電離層反射波の届く最長の距離をあらわす。7MHz 帯, 14MHz 帯のそれぞれの所要電力閾値は SN 比が 0 より大きくなる値として -79dBm, -92dBm と設定する。受信電力値がこの閾値より大きくなる範囲が電離層反射波での通信可能範囲とする。なお, 地上波の通信距離はそれぞれ SN 比が 0 より大きくなる値として 100km, 110km とした[27]。送信局の送信電力は, 災害情報の発信もしくは中継を行うために最低限必要と考えられる規模の設備を想定し, 100W, 500W, 1kW, 10kW とした。

7MHz 帯で電離層反射波を使用する際, 近距離になるにつれ位相を操作することで受信

第7章 広域エリアでのマルチホップネットワークの適用

電力が高くなっている様子がわかる。14MHz 帯では概ね 1000km 以下の距離では電波の透過量が多くなってしまいが、これを除いた範囲では 7MHz 帯の比較結果と同様に近距離になるにつれて位相を操作することで伝搬損が減少する。

表 7-5: 位相変調度数あたりの受信電力値 (7MHz)

アンテナ	1element	2 elements					
位相差	—	0°	-30°	-60°	-90°	-120°	-150°
指向性	—	16.3°	17.3°	19°	23°	34°	39°
兵庫	-106.2	-108.6	-106.5	-104.8	-104.8	-102.5	-108.6
韓国	-54.4	-56.9	-56	-58.8	-55.2	-51.8	-50
中国	-40.4	-34.9	-38.7	-39.2	-35.7	-29.4	-29.3
ベトナム	-77.9	-69.7	-74.3	-74	-78	-75.3	-77.1

表 7-6: 位相変調度数あたりの受信電力値 (14MHz)

アンテナ	1element	2 elements					
位相差	—	0°	-30°	-60°	-90°	-120°	-150°
指向性	—	19.2°	20.4°	23.2°	36.7°	41.5°	44.3°
兵庫	-115.1	-111.1	-111.6	-111.5	-111.7	-112.4	-113.4
韓国	-63.7	-60	-60.5	-62.6	-62.6	-59.6	-55.2
グアム	-66.3	-60.9	-58.6	-59.6	-61.8	-60.8	-61.1
タイ	-75.9	-68.3	-68.6	-68.2	-70.2	-68.5	-69.4
インド	-84.8	-85	-79.9	-83.4	-83	-78.3	-81.1

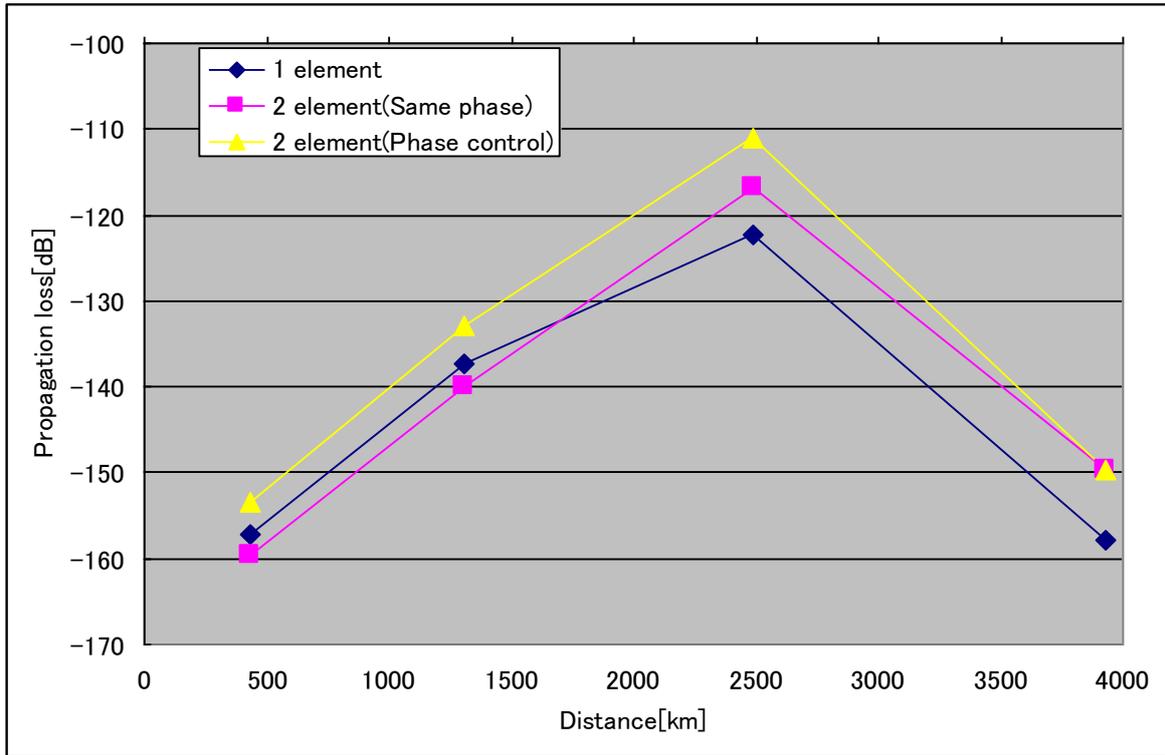


図 7-12: 7MHz 電離層反射波の伝搬特性比較

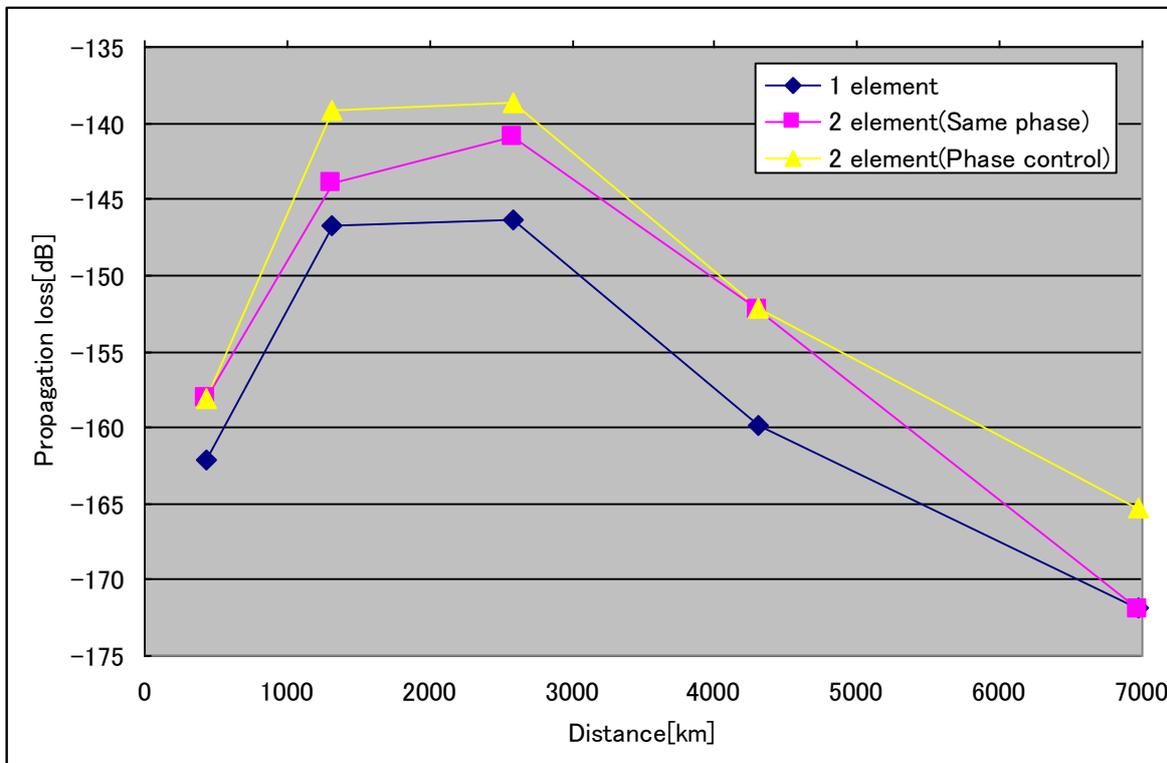


図 7-13: 14MHz 電離層反射波の伝搬特性比較

第7章 広域エリアでのマルチホップネットワークの適用

表 7-7: 各出力送信時の電離層反射波の到達距離 (7MHz)

	跳躍距離[km]		
	1 element	2 elements (same phase)	2 elements (phase control)
100W	1970	1860	1520
500W	1410	1500	1180
1 k W	1240	1350	1050
10 k W	790	900	610
	最長通信距離[km]		
	1 element	2 elements (same phase)	2 elements (phase control)
100W	2760	3020	3150
500W	3050	3330	3420
1 k W	3170	3470	3530
10 k W	3580	3900	3900

表 7-8: 各出力送信時の電離層反射波の到達距離 (14MHz)

	跳躍距離[km]		
	1 element	2 elements (same phase)	2 elements (phase control)
500W	1180	1000	850
1 k W	1010	820	710
	最長通信距離[km]		
	1 element	2 elements (same phase)	2 elements (phase control)
500W	2930	3810	3900
1 k W	3310	4260	4280

7.5 シミュレーション評価

HF 帯を用いた広域マルチホップ通信モデルについて、7.4 で得られた電離層反射波の特性評価の実験結果をもとに、計算機シミュレーションを行うことでモデルの性能を評価する。まずは、HF 帯フェーズドアレーアンテナの特性とマルチホップネットワークの効果を証明するために、情報パケットの送信時にタイミング制御を行わないランダムモデルについてシミュレーションする。次に、ランダムモデルと送信タイミング選択モデルとを比較評価し、提案モデルの有効性を考察する。

7.5.1 シミュレーション諸元

まず、フェーズドアレーアンテナの実験結果を用いて広域 HF 帯マルチホップネットワークの性能評価を行う。シミュレーションパラメータは表 7-9 に示すとおりである。

次に、マルチホップネットワークの既存のアクセス方式を用いて ShiftSlot 以内でランダムにパケットを送信する方式をランダムモデルとして性能評価する。また、本節における提案方式をタイミングシフトモデルとして性能評価を行い、それぞれの特性を比較検討する。計算機シミュレーションによる各種パラメータは表 7-10 のように設定して行う。

実験結果として、特性が優れていたアンテナ 2 本で位相ありの場合の結果を用いた。2 本のアンテナに給電する電流の位相差としては、電離層反射波の最短跳躍距離において最も大きな特性の改善がみられた -150° の場合を適用した。S/N 比は 7.4.3 の伝搬損をもとに送信出力値 500W を想定した際に受信すると推定される電力値と、内部雑音と都市における外部雑音の合計値から算出した。今回のシミュレーションでは、S/N 比が 30dB 以上のエリアを level 2, 20dB-30dB のエリアを level 1, 0-20dB のエリアを level 0 とした。情報パケットの Interval slot とは、情報パケットが転送されるまでの期限の最大値である。

表 7-9: 実験結果評価用シミュレーションパラメータ

使用周波数	14MHz
使用アンテナ形式	1 素子 2 素子 (位相差なし) 2 素子 (位相制御あり)
送信電力[W]	500W, 1kW
端末数	100
シミュレーションフィールド幅[km]	100~3000
Hop 数	1-9

第7章 広域エリアでのマルチホップネットワークの適用

表 7-10: 比較用シミュレーションパラメータ

パケット発生率	0.0001-0.0011
局数	100, 300
シミュレーションフィールド幅[km]	10000
情報パケットの Interval slot	250
Shift slot	50
S/N 比[dB]	level=0 : 0~20 level=1 : 20~30 Level=2 : 30 以上
位相差[deg.]	-150

7.5.2 シミュレーション結果及び考察

提案システムを正常に稼働させるために、必要なネットワークスケールや、マルチホップの中継局数について検討した。hop 数は中継局の最大局数と定義する。

また、従来の方式をランダムモデルとして、送信タイミング選択モデルをタイミングシフトモデルとして性能を比較評価する。

性能評価方法として、hop 数に制限を与えた場合のシミュレーションフィールドあたりのカバー率を求めた。他の評価方法としては、パケット衝突率、スロット成功率を求めた。評価方法は以下の通りである。

- カバー率 (Coverage Rate) = シミュレーションエリアに存在するすべてのの局に対して、ある局から送信される情報パケットがマルチホップネットワークを用いて中継されることで到達する局の割合
- パケット衝突率 (Packet Collision Rate) = 送信・転送された全パケットあたりの衝突したことで受信されなかったパケットの割合
- スロット成功率 (Slot Success Rate) = 送受信に使用されたスロットあたりのパケット衝突が起こらなかったスロットの割合

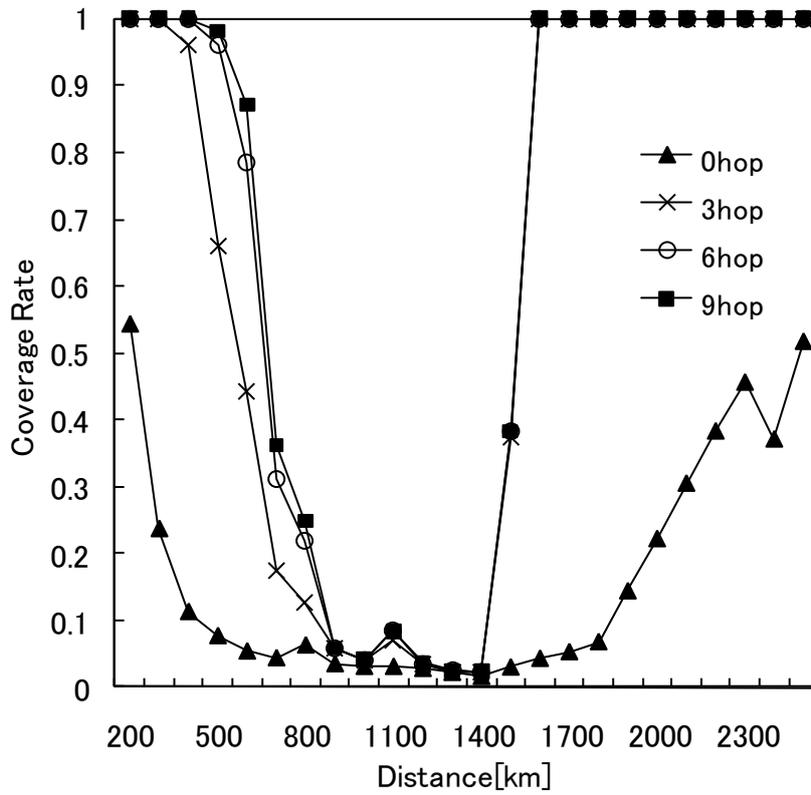


図 7-14: ネットワークスケールとカバー率の関係 (アンテナ 1 素子)

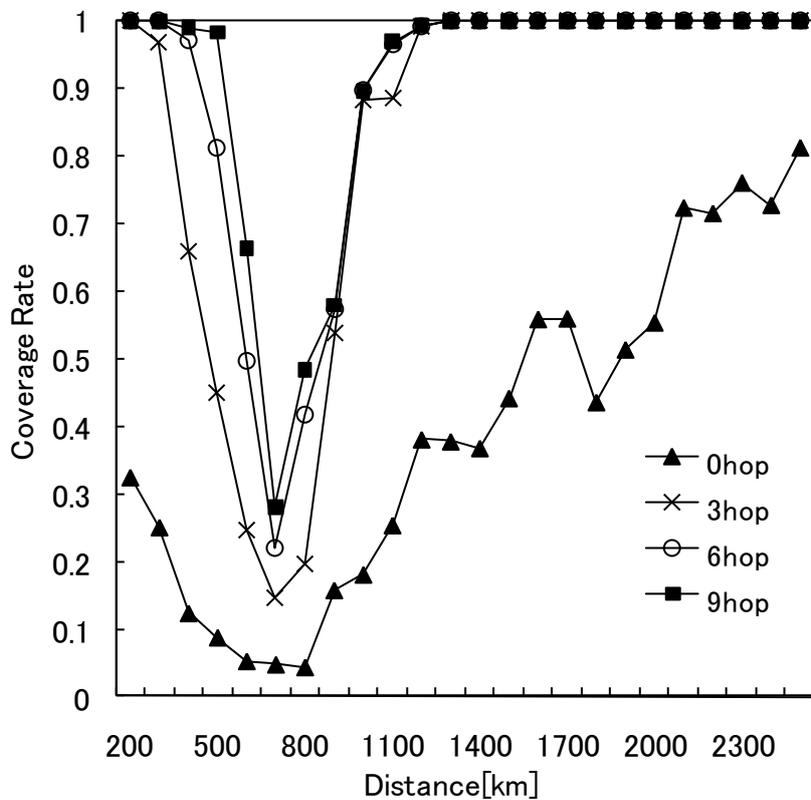


図 7-15: ネットワークスケールとカバー率の関係 (アレーアンテナ同相 2 素子)

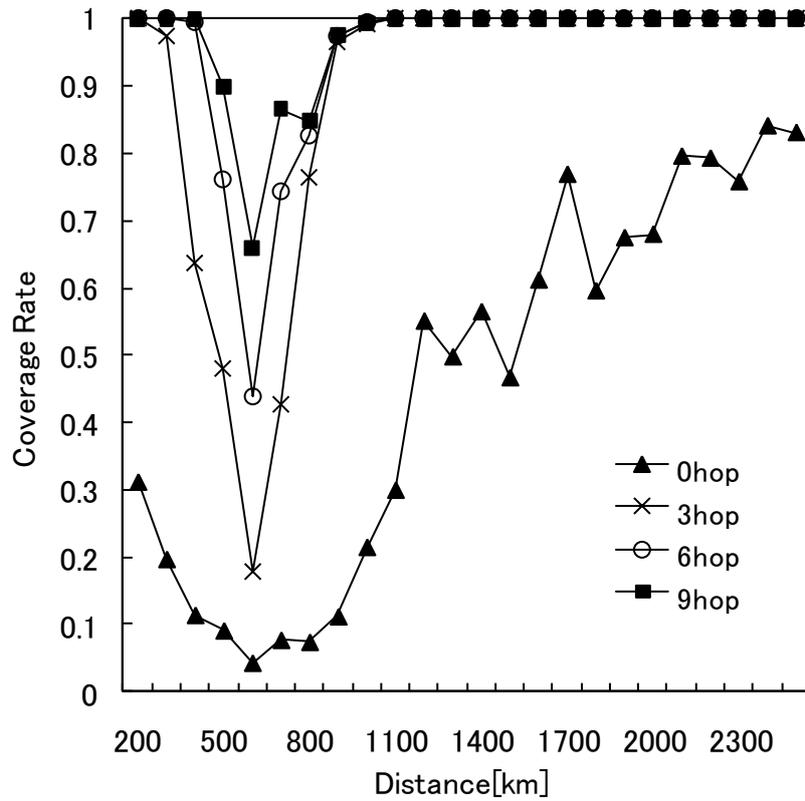


図 7-16: ネットワークスケールとカバー率の関係 (アレーアンテナ位相差有 2 素子)

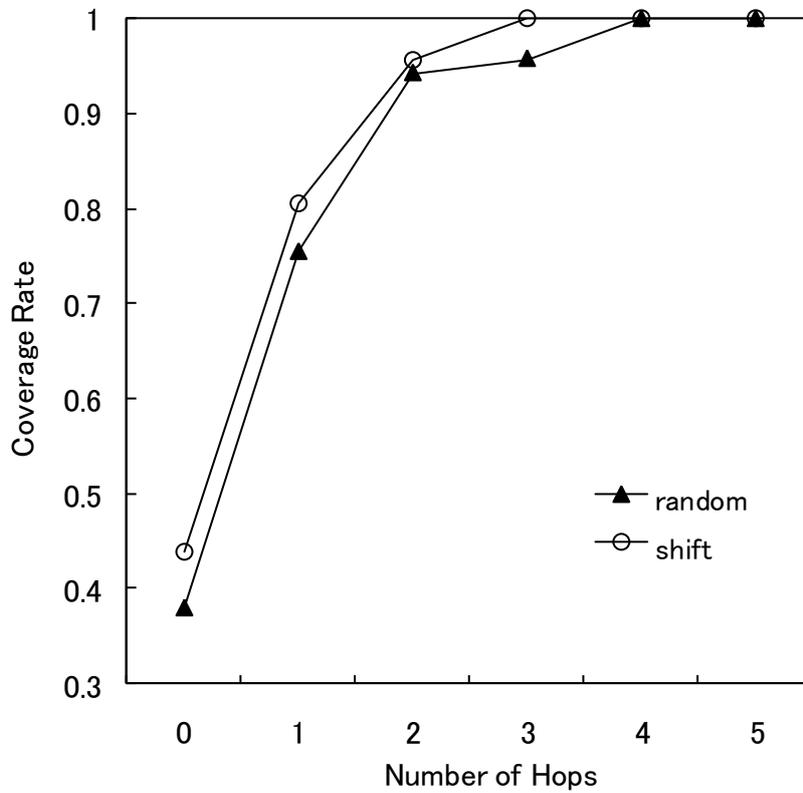


図 7-17: hop 数別カバー率の比較

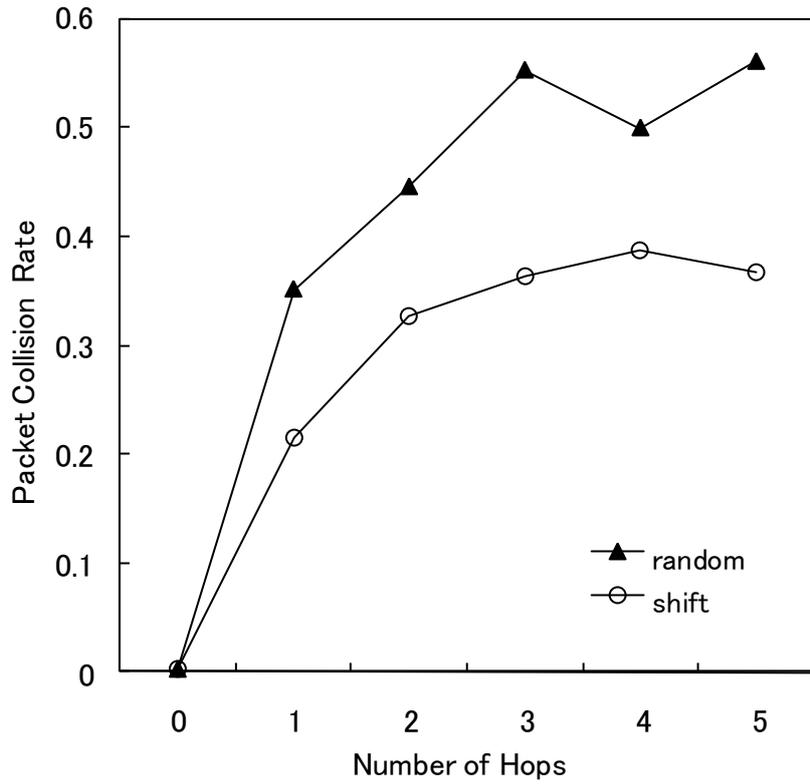


図 7-18: パケット衝突率の比較

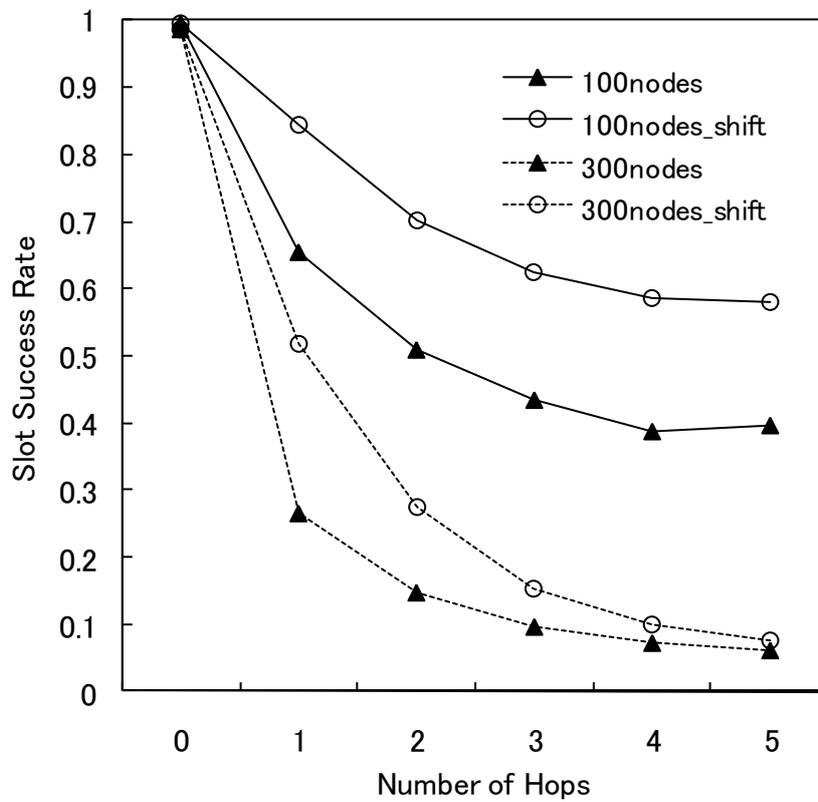


図 7-19: hop 数とスロット成功率の関係

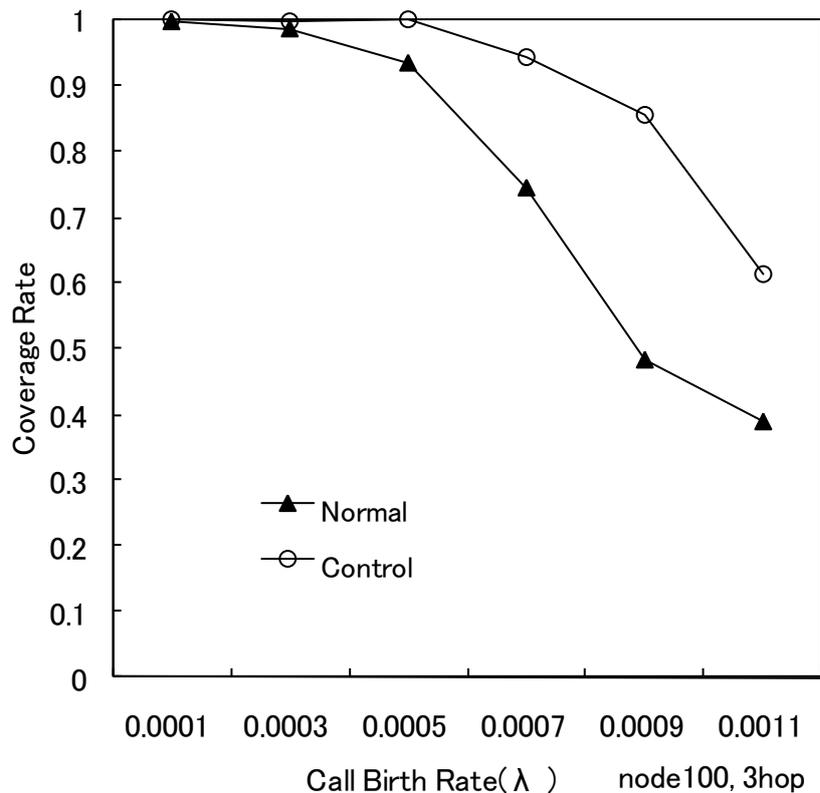


図 7-20: 転送制御の有無によるカバー率の比較

図 7-14 は使用周波数 14MHz, アンテナ数 1 本, 送信電力 1kW, 局数を 100 局, 呼発生率を 0.0001 としたカバー率である. グラフより, ある一定の局密度においてカバー率が悪化してしまうことがわかる. これはスキップゾーンにある局の数が増えたことが原因だと推測される.

図 7-15 は使用周波数 14MHz, アンテナ数 2 本 (位相差なし), 送信電力 500W, 局数を 100 局, 呼発生率を 0.0001 とした場合のカバー率である. 図 7-16 は周波数 14MHz, アンテナ数 2 本 (位相差あり) で同条件とした場合のカバー率を求めたグラフである. 周波数や送信電力を操作することでカバー率の悪化を抑えることができることが示された. 図 7-16 で特に明らかだが, アンテナ仰角指向性を変化させることでスキップゾーンが縮小することがわかる. また, どのグラフも hop 数を増やすことでカバー率が向上し, スキップゾーンが縮小していることが明らかとなった.

図 7-17 は hop 数に制限をかけた場合のカバー率において, 局数を 100 局, 呼発生率を 0.0001 とし, アンテナ数 2 本 (位相差あり), 送信電力 500W で送信タイミング選択モデル (shift) とランダムモデル (random) とを比較したグラフである. 3hop でカバー率が満たされることが示され, またタイミングシフトモデルを適用した方が若干だが性能向上が伺える.

図 7-18 は送信タイミング選択モデルとランダムモデルの packets 衝突率を hop 数の制

限ごとに比較したグラフである。局数を 100 局，呼発生率を 0.0001 とした。従来のパケット転送方式であるランダムモデルに比べて提案モデルを導入することでパケット衝突率が最大で約 0.2 減少することが示された。つまり提案モデルを用いることで，各局の負担が軽減できていることが伺える。

図 7-19 は両方式における hop 数に制限を与えた際のスロット成功率の関係を比較したグラフである。▲がランダムモデル，○が送信タイミング選択モデルを表しており，実線が 100 局，点線が 300 局の場合における結果である。パケット発生率は 0.0001 として行った。100 局の場合についてランダムモデルと，タイミングシフトモデルとを比較すると，1hop から 5hop について，いずれの hop 数でも 1 割ほどスロット成功率が向上している。300 局のランダムモデル，タイミングシフトモデルを比較すると，提案モデルはランダムモデルに比べ hop 数が 1hop の時に成功率がおおよそ 0.25 改善されており，性能が向上していることが示された。ただし，1hop 以降は hop 数の増加と共に改善幅が少なくなっている。これはネットワーク内のトラヒック量が増えすぎてしまったため，タイミングシフトモデルによるパケット衝突回避の効果が薄れてくることによるものと考えられる。

そこで高トラヒック時において更にパケットの衝突を抑制するため，受信電力レベル 2 の端末はフラッディングしないという制御を行った場合の送信タイミング選択モデル (Control) と，制御を行わなかった場合のモデル (Normal) について計算機シミュレーションによる性能評価を行った。図 7-20 は両モデルについてカバー率を求めたグラフである。局数は 100 局，制限 hop 数は 3hop とし，呼の発生率を 0.0001-0.0011 まで変化させてシミュレーションを行った。図 7-20 から高トラヒック時において転送制御を付加することでカバー率が最大約 0.37 改善されることが示された。つまり，高トラフィック時には，適宜情報パケットを転送しない抑制制御を行うことで，ネットワークの性能が向上し，更に中継局の負担も減少できることが明らかとなった。

7.6 むすび

災害時に広域を網羅するネットワークとして広域 HF 帯マルチホップ通信モデルを提案した。HF 帯通信において，電離層反射波での通信可能エリアを広げるために，フェーズドアレーアンテナを用いることを検討し，アンテナ仰角を操作した際の受信電力の測定実験を行った。電離層反射波による実験結果から使用周波数を 7MHz とした場合と使用周波数を 14MHz とした場合は共に，アンテナ 1 本を使用して信号を受信した場合よりアンテナ 2 本のフェーズドアレーアンテナを用いて両アンテナとも同相として信号を受信した場合の方が受信電力値は向上する。更に片方のアンテナで信号の位相をずらし仰角を操作することで，より受信電力が増すことを確認した。つまり，フェーズドアレーアンテナを用い，信号の位相をずらして仰角を制御することで，電離層反射波の通信可能エリアが拡大することを示した。

第7章 広域エリアでのマルチホップネットワークの適用

これらの実験結果をもとに本提案モデルをシミュレーションにより性能評価した結果、HF 帯通信の特徴であるスキップゾーンの影響で信号を受信できない局があっても、マルチホップを用いればそれらの局をカバーできることが示された。スキップゾーン問題によるカバー率の悪化は、使用するアンテナによって異なるが、仰角を操作することで電離層反射波の跳躍距離を広くできれば、カバー率を改善できることも明らかとなった。同時に、hop 数の制限を増やすこともカバー率向上に効果的であることがわかった。また、受信電力にもとづく送信タイミング選択モデルを導入することでパケット衝突率を低減することが可能となる。更に高トラヒック時にはパケットを転送する局数を制限することでパケットロスを防ぎカバー率が改善することが明らかとなった。

第8章

結論

8.1 本研究で得られた成果

マルチホップネットワークの利点を生かし、無線通信の各分野へマルチホップネットワークを効果的に適用する新たな通信モデルの確立と、ルーチングのアクセス方式を提案し評価を行った。

第2章ではマルチホップネットワークの概要と、そのルーチングプロトコルである DSR, AODV 方式について詳しく述べ、ルーチングを行う上での問題点を示した。またマルチホップネットワークに関する従来研究を紹介し、モバイル通信へマルチホップネットワークを適用する際の検討課題を述べた。また、本論文の軸研究となるマルチホップネットワークをモバイル通信へ適用するマルチホップモバイル通信モデルの特性と検討課題を述べた。このモデルは基地局カバーエリア拡大を目的とし、既存のモバイル通信とマルチホップネットワークを融合するモデルである。第2章で述べたマルチホップ特有の課題を考慮したマルチホップモバイル通信モデルの確立について、第3章、第4章、第5章で詳しく検討した。

第3章ではルーチング方式として既存の AODV 方式を用いた AODV 適用型モデルを計算機シミュレーションにより評価した。結果として、通信要求パケットを送信する回数については、送信回数を増やせばネットワーク構築率を向上できることが示され、本モデルにおいては RREQ 送信回数を3回とすることでルート構築率が最大値に達することが明らかとなった。送信回数を増やしてもパケット衝突へは影響がないことも示した。また、基地局のカバーエリア内にある圏内端末が中継端末の候補として複数端末存在する際の、最適な中継端末選択について、基地局下り電力考慮モデルとして提案した。性能を評価した結果、基地局推奨受信電力レベルを最大値として設定し中継端末を選択することでネットワーク確立要求への適応能力向上が図れることを示した。AODV 適用型モデルにより基地局の通話可能エリアの拡大が図れることを明らかとしたが、端末数の増加に伴うパケット衝突率の増加が確認され、転送依頼端末数が増えることで端末の負担が更に増加する問題が明らかになった。

そこで AODV 適用型モデルでブロードキャストされていた通信要求パケットをユニキャストするユニキャスト方式を考案した。ユニキャスト送信先となる転送依頼端末選択方

第8章 結論

法として、バーチャルマップモデルと圏外経過時間考慮モデルを提案した。

第4章では端末間受信信号レベルを距離のパラメータに変換し、端末の位置を相対的に推定したバーチャルマップを作成してユニキャスト先を選択するバーチャルマップモデルについて述べた。本モデルをシミュレーションにより性能評価し有効性を示した。まずマルチホップネットワークの QoS 性能が向上するような転送依頼端末選択方法として端末間の推奨 E_b/N_0 値を参照する方法を提案し、シミュレーションによりその値を算出した。また、AODV 適用型モデルとバーチャルマップモデルとを性能比較評価した結果、バーチャルマップモデルはルート構築率に関して高負荷時においては特に優れた特性が示され、パケット衝突率を削減でき、更に制御パケット流出も抑えることで他端末への負担が軽減できるという効果を示した。

第5章ではネットワークを早期に発見するために、圏外になってからの経過時間が基地局からの距離に比例すると想定し、圏外経過時間が短い端末をユニキャスト先を選択する圏外経過時間考慮モデルについて述べた。本モデルをシミュレーションにより性能評価し有効性を示した。その結果、圏外経過時間考慮モデルを用いれば AODV 適用型モデルに比べ、ネットワークの構築が早いうえ、パケットの衝突率を軽減でき、更に端末数が増加してもルート構築率は劣化せずむしろ性能が向上することを示した。

以上から、モバイル通信へマルチホップネットワークを適用する際に、通話のように長く接続する必要がある場合は、QoS 性能が高いバーチャルマップモデルが適している。また、パケット通信のように一時的にアクセスする必要がある場合は、即座にネットワークを構築できる圏外時間考慮モデルが適している。つまり使用場面に応じてアクセス方式を変化させることも性能向上の面で有効である。マルチホップモバイル通信が実現すれば、基地局を増設しなくてもよくなり、経費の削減とモバイル端末の更なる普及が期待できる。

第6章ではメトロポリタンエリア内通信においては通常の交換局を介さず、家庭用固定無線端末のみでマルチホップネットワークを構築する家庭用固定無線端末を用いたマルチホップ通信モデルを提案した。まず呼損率について理論解析により理論式を算出し、計算機シミュレーション結果と照らし合わせることで、理論解析とシミュレーションの整合性を示した。また呼損率と強制切断率を求めた結果、呼発生率の増加に伴い強制切断率と呼損率が急激に悪化してしまうことを示した。最大ホップ数 H_{\max} を増やすことで呼損率の悪化を防げるが強制切断が頻繁に起こってしまうことも明らかとなった。ノードの通信可能距離を伸ばすことで 1hop 通信が可能となり強制切断率が起こりにくくなるが、呼発生率の増加に伴い強制切断は生じやすくなる。ただし、ノードの使用頻度をもとに中継ノードを選択する方式を適用することでモデルの性能向上が期待できる。本モデルを用いれば交換局の負荷が軽減でき、メトロポリタンエリア内電話において無料通話サービスが実現できる。更に交換局が障害などで機能しない際も、ノードのみで通信可能なので災害時通信としても使用できる。

第7章では災害などによる緊急用の広域エリア通信にマルチホップネットワークを適用

した広域 HF 帯マルチホップ通信モデルを提案した。HF 帯の特徴であるスキップゾーン問題を解消するため、フェーズドアレーアンテナを用いてアンテナの仰角を操作することでスキップゾーンの縮小を図り、マルチホップネットワーク適用でスキップゾーンの補完を行う。まず、フェーズドアレーアンテナについて受信電力測定する実験を行った結果、7MHz 帯および 14MHz 帯においてフェーズドアレーアンテナの仰角を操作することで同相のアンテナ 2 本を使用した場合に比べ受信電力値が向上し、スキップゾーンの縮小を示した。次に、これらの実験結果をもとに本モデルを計算機シミュレーションにより評価した結果、スキップゾーンが補完されることが示された。ただし、マルチホップネットワークのフラグディングによりパケット衝突が頻繁に生じるので、改善するために送信タイミング選択モデルを提案した。送信タイミング選択モデルを導入した場合と導入しないランダムモデルとを比較評価した結果、導入モデルによりパケットの衝突率が改善されることが証明された。また、高トラフィック時には情報パケットの転送制御をすることでカバー率を向上できることを示した。本提案モデルにより、被害エリアにおける状況把握、救助要請といった情報提供の連絡手段確保が可能となり、被害エリア間通信、更には被害エリア外通信も可能となる。広域エリアをカバーするため、世界中のあらゆるエリアにおいても効果的な通信手段となる。

以上からマルチホップネットワークは、無線通信分野におけるあらゆる通信スケールで、効果的に活用できることが明らかとなった。通信場面や状況に応じて適宜、ルーチングのアクセス方式を変化させることで、各通信モデルの性能を向上できる。更にマルチホップネットワークを効率よく無線通信へ適用することで、より快適で柔軟な無線通信が実現可能となる。最終的には、モビリティ性の高いモバイル通信から広域なネットワーク構築が可能な HF 帯通信にまで幅広くマルチホップネットワークを適用し、各通信をマルチホップネットワークで融合させることで、あらゆる通信を網羅するグローバルネットワークの構築が期待できる。

8.2 今後の課題

本研究で提案したモデルを更に改善し、より現実的なモデルに発展させる。特にマルチホップモバイル通信モデルにおいては、提案したバーチャルマップモデルと圏外経過時間考慮モデルの優れた点のみを集約するようなアクセス方式の開発を行う。

メトロポリタンエリアでの家庭用固定無線端末を用いたマルチホップ通信モデルにおいては、家庭用固定無線端末の頻度に応じてアクセス方式を制御するアルゴリズムを提案することでモデルの更なる改良を行う。

今後もさまざまな無線通信分野において、マルチホップネットワーク適用の可能性について追求し、効果的なアクセス方式を検討する。最終的には、あらゆるノードがマルチホップによりグローバル自律分散型ネットワークを構築する無線通信モデルの実現を図る。

謝 辞

本研究の行うにあたり，日頃より熱心に御指導と御鞭撻を賜りました早稲田大学大学院国際情報通信研究科の嶋本薫教授に謹んで感謝の意を表します．本論文は嶋本薫教授による御指導の下に取りまとめたものであり，執筆にあたりまして終始熱心な御指導と叱咤激励を賜りましたこと，改めまして心より深く御礼申し上げます．

また論文総括や研究方針に関して大変に貴重な御指導や御示唆を頂きました早稲田大学大学院国際情報通信研究科の田中良明教授，松本充司教授，佐藤拓朗教授に心より深く御礼申し上げます．

本研究を進める上で御協力をいただきました二木康則氏，白錦淑氏，Abdulla M Alshehad 氏，村松宏昭氏，粟立氏をはじめとする嶋本研究室の皆様に深く御礼申し上げます．

最後に，私が大学院において研究するにあたり，継続的に励まし支えてくれました両親と家族に深く感謝いたします．とりわけ論文執筆に取り組む環境を与えてくれ献身的にサポートしていただいた夫の康則さんに，心より感謝いたします．

参考文献

- [1] Mobile Ad-hoc Networks (MANET).
<http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [2] 総合科学技術会議, <http://www8.cao.go.jp/cstp/>
- [3] E.M. Royer and C.K. Toh, "A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks," IEEE Personal Communication, vol.6, no.2, pp.46-55, April 1999.
- [4] Rajendra V.Boppana and Satyadeva P Konduru, "An adaptive Distance Vector Routing Algorithm for Mobile, Ad Hoc Networks," In Proc.of INFOCOM 2001, vol.3, pp.1753-1762, Apr.2001.
- [5] 藤原淳, 竹田真二, 吉野仁, 大津徹, "マルチホップワイヤレス通信における中継用チャネル割当法," 信学技報, RCS2002-327, pp125-128, March 2003.
- [6] 織田将人, 上原秀幸, 横山光雄, 伊藤大雄, "端末の packets 中継機能を用いた安否確認ネットワークの検討," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J85-B, no.12, pp2037-2044, Dec. 2002.
- [7] J. Macker, "Simplified Multicast Forwarding for MANET," IETF MANET Working Group.
<http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-smf-06.txt>
- [8] IETF MANET Working Group, Manet Status Pages,
<http://tools.ietf.org/wg/manet/>
- [9] M.S. Corson and J. Macker, "Mobile ad hoc networking (MANET) routing protocol performance issues and evaluation consideration," IETF RFC 2501, Internet Engineering Task Force, Jan.1999.
- [10] 沖野正宗, 加藤聡彦, 牛島準一, 伊藤秀一, 飯作俊一, "高密度アドホックネットワークのための AODV ルーティングプロトコルの提案," 情報処理学会論文誌, 巻 45 号 12, pp2557-2565, 2004.
- [11] S.J. Lee, M. Gerla and C.K. Toh, "A simulation study of table driven and on-demand routing protocols for mobile ad hoc networks," IEEE Networks, vol.13, no.4, pp.48-54, July 1999.
- [12] C-K.Toh, "アドホックモバイルワイヤレスネットワーク," 共立出版, 2004.
- [13] A. Svenson and M. Rydstrom, "A communication network for safe traffic and efficient transportation," Proc, 11th Wireless World Research Forum Workshop, Norway, June 2004.

参考文献

- [14] 藤原淳, 竹田真二, 吉野仁, 大津徹, 山尾泰, “ブロードバンド CDMA セルラ方式におけるマルチホップアクセス法のシステム容量増大効果,” 電子情報通信学会論文誌, VOL.J85-B, No.12, pp2073-2079, 2002.
- [15] 古桶知重, 大平孝, “無線アドホックネットワークにおける指向性アンテナの効能に関する考察,” 電子情報通信学会論文誌 B, VOL.J85-B, No.12, pp2223-2233, 2002.
- [16] Toshiomi Takahashi, Toshihisa Ozawa and Yukio Takahashi, “Bounds of performance measures in large-scale mobile communication networks,” Performance Evaluation, Volume 54, Issue 3, pp263-283, 2003.
- [17] 山本平一, 加藤修三, “TDMA 通信,” 電子情報通信学会編, vii, 222p, 1989.
- [18] 森野洋平, 佐方連, 村田英一, 吉田進 “自律分散無線ネットワークとセルラネットワークにおける送信電力比較,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS, pp79-84, 2000.
- [19] 田中喜好, “スペクトル拡散を用いたコードレス電話”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J77-B, No.11, pp703-710, 1994.
- [20] 小西良弘, 横山光雄, “移動通信技術の基礎,” 日刊工業新聞社
- [21] 横山光雄, “移動通信ネットワーク,” 昭晃堂
- [22] 奥井重彦, “仲上 m フェージングチャネル,” 電子情報通信学会誌, Vol86, No12, pp969-971, 2003.
- [23] C.E. Perking, E.M. Belding-Royer and S.R. Des, “Ad hoc on demand distance vector(AODV) routing,” IETF Internet Draft.
<http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-10.txt>.
- [24] D.B. Johnson, D.A. Maltz, Y.C. Hu and J.G. Jetcheva, “The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks,” IETF Internet Draft.
<http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-07.txt>
- [25] 細谷良雄, “電波伝搬ハンドブック,” リアライズ社, 1999.
- [26] 前田憲一, 木村磐根, “現代電磁波動論,” オーム社, 1984.
- [27] “アンテナおよび電波の伝わり方,” 電気通信振興会, 1997.
- [28] 飯田尚志, “衛星通信,” オーム出版社
- [29] 斎藤忠夫, 立川敬二, “移動通信ハンドブック,” オーム社, 2000.
- [30] Tawan Thongpook and Thanachai Thumthawatworn, “Adaptive Zone Routing Technique for Wireless Ad hoc Network,” In Proc.of ITC-CCSC 2002, Phuket, Thailand , Jul.2002.
- [31] Mario Gerla, Guangyu Pei, Xiaoyan Hong and Tsu-Wei Chen, “Fisheye State Routing Protocol (FSR) for Ad hoc Network,” draft-ietf-manet-fsr-00.txt, IETF MANET Working Group, Internet Draft, May 2001.

- [32] J. Macker, "Simplified Multicast Forwarding for MANET," IETF MANET Working Group. IETF Internet Draft.
<http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-smf-06.txt>
- [33] C. E. Perking, E.M. Belding-Royer and S.R. Des, "Ad hoc on demand distance vector(AODV) routing," IETF MANET Working Group. IETF Internet Draft.
<http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- [34] D.B.Johnson, D.A.Maltz and Y-C Hu, "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)," IETF MANET Working Group, Internet Draft, July.2004.
- [35] T.Clausen and P.Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," Network Working Group, RFC 3626, Oct.2003.
- [36] R.Ogier, F.Templin and M.Lewis, "Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)," Network Working Group, RFC 3684, Feb.2004.
- [37] C.Perkins, E.Belding-Royer and S.Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, Network Working Group," RFC 3561, Jul.2003.
- [38] 向井務, 村田英一, 吉田進, "マルチホップ自律分散無線ネットワークにおけるチャネル選択アルゴリズム," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J85-B, no.12, pp.2080-2086, 2002.
- [39] 田中析男, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司, "アドホックネットワークングを適用したセルラシステムのトラヒック特性の解析," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J85-B, no.12, pp.2063-2072, 2002.
- [40] 北岸弓子, 上原秀幸, 山本亮, 横山光雄, 伊藤大雄, "マルチホップ無線ネットワークにおける優先領域に基づく中継制御法," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J85-B, no.12, pp.2119-2128, 2002.
- [41] 白錦淑, A.M. Alshehab, 那須有希子, 嶋本薫, "HF帯を用いたマルチホップ網に関する研究," 日本シミュレーション学会, 2004.
- [42] H.K. Rouf and S. Shimamoto, "Studies on multihop high frequency communication systems," 電子情報通信学会総合大会, BS-8-13, 2006.
- [43] 谷口慶治, "アンテナと電波伝搬," 共立出版, 2006.
- [44] 電子通信学会, "アンテナ工学ハンドブック," オーム社, 1980.
- [45] 唐沢好男, "デジタル移動通信の電波伝搬基礎," コロナ社, 2004.
- [46] LATEST CATALOGUE OF DATA IN WORLD DATA CENTER FOR IONOSPHERE,
<http://www.wdc.nict.go.jp/>
- [47] M. katayama, K. Mizuno, M. Nakayama and M. Shimizu, "A multi-protocol wireless multi-hop network employing a new efficient hybrid routing scheme," IEEE VTC 2003-Spring, Vol 3, pp2013-2017, April.2003.

参考文献

- [48] IEEE:IEEE802 LAN/MAN Standards Committee,
<http://www.ieee802.org/>
- [49] 虫明康人, “アンテナ・電波伝搬,” コロナ社, 1961.
- [50] 蓑妻二三雄, “第2時通信工学講座 基礎編 1-D 通信と雑音,” 共立出版, 1961.
- [51] 電気通信振興会, “アンテナおよび電波の伝わり方,” 1997.
- [52] 藤原孝洋, 飯田登, 渡辺尚, “アドホックネットワークを併用する緊急通信無線網のアクセス方式,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J86-B, no,11, pp2345-2356, 2003.

研究業績

類別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月日, 連名者
論文誌 論文	○“中継局選択型マルチホップモバイル通信に関する研究,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J88-B No.1, pp234-244, 2005 年 1 月 <u>那須有希子</u> , 嶋本薫
	○“HF 帯を用いた広域マルチホップネットワークに関する研究,” GITS/GITI 紀要 2007-2008, pp.138-146, 2008 年 <u>那須有希子</u> , 村松宏昭, 嶋本薫
国際会議	○ “A Study of Multi-hop Mobile Communication Access Models Considering Elapsed Time from Coverage Area,” IEEE/ACES Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics (WCACEM) 2005, pp1033-1036, Hawaii, USA, April 2005 <u>Yukiko NASU</u> and Shigeru SHIMAMOTO
国内研究会	“アンテナ仰角制御を用いた短波帯広域無線ネットワークに関する研究,” 電子情報通信学会技術研究報告, ISSN 0913-5685, pp.65-70, 2008 年 1 月 村松宏昭, <u>那須有希子</u> , 嶋本薫
	“HF 帯を用いたマルチホップ網に関する研究,” 多次元移動情報通信網自動設計技術研究会, 2004 年 11 月 白錦淑, Abdulla M. Alshehab, <u>那須有希子</u> , 嶋本薫

研究業績

国内大会	<p>○“マルチホップモバイル通信におけるユニキャスト型アクセス方式に関する一考察，” シミュレーション研究会，2004年6月 <u>那須有希子</u>，嶋本薫</p> <p>“コードレス電話を用いたマルチホップネットワークモデルの提案，” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集，B-7-74，2006年9月 栗立，<u>那須有希子</u>，嶋本薫</p> <p>○“AODV を用いたモバイルマルチホップネットワークにおける制御パケット送信回数と送信タイミングに関する検討，” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集，BS-7-14，pp92-93，2004年9月 <u>那須有希子</u>，嶋本薫</p> <p>○“モバイルマルチホップ通信における基地局受信電力を考慮したアクセス方式に関する研究，” 電子情報通信学会総合大会講演論文集，B-7-6，2004年3月 <u>那須有希子</u>，嶋本薫</p> <p>○“圏外経過時間を考慮したマルチホップ通信モデルに関する検討，” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集，B-7-88，2003年9月 <u>那須有希子</u>，嶋本薫</p> <p>○“アドホックネットワークを利用したモバイル通信システムに関する一考察，” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集，B-7-22，2002年9月 <u>那須有希子</u>，嶋本薫</p>
------	---