アドホックネットワーキングを適用したセルラシステムの通信トラヒック特性に関する研究

田中 哲男

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程

情報理工学専攻

目 次

第1章　序論 **6**

1.1　研究の背景–移動通信の現状と課題 6

1.2　研究の目的 11

1.3　研究の概要 19

第2章　直接通信ネットワークの通信トラヒック特性の解析 **25**

2.1　はじめに 26

2.2　直接通信ワイヤレスネットワークモデル 31

2.3　直接通信ワイヤレスネットワークのトラヒック解析 33

2.3.1　トラヒックの密度 33

2.3.2　呼の処理規則 35

2.3.3　直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率 35

2.4　直接通信ワイヤレスネットワークの適用範囲 40

2.5　計算結果と議論 43

2.5.1　直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率 43

2.5.2　直接通信ネットワークが効果的である範囲 45

2.6　まとめ 57

第3章　アドホックリレーネットワークの通信トラヒック特性の解析 **61**

3.1 まえがき 61

3.2 モデル 65

3.3 解析 69

3.3.1 通常のセルラ方式の呼損率 69

3.3.2 アドホックリレー系の呼損率 70

3.4 計算例と議論 77

3.4.1 呼損率 77

3.4.2 運ばれた呼量 89

3.5 多段中継 91

3.6 アドホックリレーネットワークの実現と関連研究 101

3.6.1 中継端末の実現方法 101

3.6.2 中継端末および中継ルートの発見方法 103

3.7 まとめ 105

第4章 結論 **109**

図目次

1.1 セルラネットワーク 9

1.2 アドホックマルチホップネットワーク 10

1.3 直接通信ネットワーク 14

1.4 アドホックリレーネットワーク 16

1.5 本研究の構成 21

2.1 セルラ方式とアドホック方式の併用システム 30

2.2 直接通信ワイヤレスネットワーク (two-hop wireless network) のモデル円形セルとノードの通信範囲 32

2.3 二つのノードの間の距離が x 以下である確率. 34

2.4 呼の到着率と D との関係. ここで λ_c は直接通信の到着率, λ_d は二段通信の到着率である. 39

2.5 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率:$\lambda_a = 7.2$ 47

2.6 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率:$\lambda_a = 6.7$ 48

2.7 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率:$\lambda_a = 7.7$ 49

2.8 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率:$\lambda_a = 8.8$ 50

2.9 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率. シミュレーション結果も重ねてプロットしてある. 51

2.10 チャネル数が $n = 31.$ であるときの直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率. 52

2.11 直接通信ワイヤレスネットワークのシミュレータ 53

2.12 チャネル数 n と運ばれた呼量 54

2.13 $a_{c,twohop}$ の $a_{c,pure}$ に対する比, ただし $\lambda = 7.2.$ 55

2.14 $a_{c,twohop}$ の $a_{c,pure}$ に対する比. ただし $\lambda = 8.3.$ 56

3.1 中継による基地局との接続 63

3.2 デッドスポットのモデル 67

3.3 $P_c = (0.8, 0.9, 80)$ の場合の呼損率の計算例. 線は理論値, ▲△○●はシミュレーションの結果を表す. 78

3.4 アドホックリレーネットワークのシミュレータ 79

3.5 $P_c = (0.7, 0.9, 70)$ の場合の呼損率の計算例. その他の条件は図 3.3 の場合と同じ 82

3.6 $P_c = (0.9, 1.0, 90)$ の場合の呼損率の計算例. その他の条件は図 3.3 の場合と同じ 83

3.7 中継可能端末密度が小さいときの呼損率 (1) P_c: $(0.8, 0.9, 40)$). その他の条件は図 3.3 の場合と同じ. 84

3.8 中継可能端末密度が小さいときの呼損率 (2)] $P_c : (0.7, 0.9, 35)$). その他の条件は図 3.3 の場合と同じ 85

3.9 中継可能端末密度が小さいときの呼損率 (3) $P_c : (0.9, 1.0, 45)$). その他の条件は図 3.3 の場合と同じ 86

3.10 二段中継. 端末 M はデッドスポットに在って, 基地局 B と通信ができない. 87

3.11 二段中継．端末 Mr が M のための中継を行って，基地局 B との通信を実現する． 88

3.12 さまざまな P_c に対する運ばれた呼量．計算の条件は図 3.3 の場合と同じ． 90

3.13 三段中継 (1) 端末 M はデッドスポットに在って基地局 B と直接通信することができない 92

3.14 三段中継 (2) 端末 $Mr1$ が中継しようとするが，$Mr1$ も基地局 B と直接通信することができない． 93

3.15 三段中継 (3) さらに端末 $Mr2$ が中継してはじめて基地局 B と直接通信することができる． 94

3.16 多段中継の効果のシミュレーション．$P_c = (0.8, 0.9, 80)$, その他の条件は図 3.3 の場合と同じ．ただし実線は二段中継を行うときの理論値 96

3.17 多段中継の効果のシミュレーション．$P_c = (0.6, 0.7, 50)$, その他の条件は図 3.3 の場合と同じ．ただし実線は二段中継を行うときの理論値 97

3.18 多段中継の生起数．$P_c = (0.8, 0.9, 80)$ の場合． 98

3.19 多段中継の生起数．$P_c = (0.6, 0.7, 50)$ の場合 100

第1章　序論

1.1　研究の背景–移動通信の現状と課題

移動無線通信は１９８０年代に開始された後，第２世代とされる日本のＰＤＣ (Personal Digital Cellualr)，ＰＨＳ (Personal Handyphone System)[1, 2]，欧米のＧＳＭ (Global System for Mobile Communications)[1, 2] にいたって，１９９０年代後半に爆発的に普及した．２００２年には IMT-2000[3] による第 3 世代のサービスが開始された．また，無線ＬＡＮ (Local Area Network) や Bluetooth[4] などの無線通信によって，いたるところに存在する携帯情報機器，コンピュータ，コンシューマ機器が相互につながれ利用されるユビキタスコンピューティング [5] が始まろうとしている．通信される情報は，当初の電話音声にとどまらず，データ通信から大量のトラヒックを発生させる，映像・音楽などのマルチメディアデータへとひろがってきている．

このような次世代移動通信システムに対する技術課題として次のような項目が挙げられている [6].

（１） 高速伝送
（２）大容量化／周波数有効利用
（３）ビットコストの低減
（４）エリアカバレッジ
（５）ワイアレス QoS 制御
（６）各種無線システム間のシームレスなサービス提供
（７）次世代インターネットサポート

本研究ではこれらの課題のうち,（2）周波数有効利用と（3）エリアカバレッジの増大とをとりあげる.

現在の移動通信系ではセルラ方式が用いられている．セルラネットワーク方式は，日本の携帯電話，PHS，欧州を始めとした各国で用いられている GSM などの第２世代ディジタルセルラシステム，あるいは現在サービスが始まりつつある第３世代ディジタルセルラシステムで実用に供されている信頼性の高い方式である [1, 2]．セルラ方式を用いる場合，多くの，互いにバックボーンネットワークで接続された基地局がサービスエリアに設置され，各基地局がセルと呼ばれる勢力圏を構成する．あるセルに存在する端末が，そのセルを構成する基地局と無線通信を行うことにより，移動通信が可能となる．一方，アドホックネットワーキングは，セルラ方式とは異なり，自立的に互いに無線通信を行う端末だけでネットワークを構築し，端末同士の通信，他の端末のための中継を行うことを可能とするものである [7, 8]．本研究では，セルラ方式にアドホックネットワーキング技術を導入することにより，セルラ方式の性能を向上させる方式について議論する.

セルラ方式には様々な問題点があるが，ここででは，２つの問題をとりあげる．まず，利用できる周波数帯域が限られているため，加入者数，通信端末数の増大による周波数帯域の不足という問題が生じている．アドホックネットワークの導入により，回線を効率的に利用して限りある周波数資源をより有効に利用することが考えられる．アドホックネットワーキングをセルラ方式に適用する試みの一つは，全ての通信を基地局経由で行うのではなく，通信しようとする二つの端末が近距離に在る場合には，端末間で直接に通信することを許そうとするものである [12, 14]

また，セルラ方式では，セルによってサービスエリアの全領域がくまなく被覆

されることが前提となるが，実際にはビルの陰など，基地局と通信できない場所（デッドスポット）が存在し，デッドスポットに入った端末は通信を行うことができないという問題がある．アドホックネットワーキング技術により，デッドスポットに在る端末でも通信することを可能にしてエリアカバレッジを改善する試みがある．すなわち，デッドスポットに在る端末のために，他の端末が中継動作を行うことにより基地局との間の通信を可能にするものである [15].

これらの試みの中で，実際にアドホックネットワーキングをセルラ方式に適用した場合に，上記の問題がどの程度解決されるのか，についての評価は，ほとんどの場合シミュレーションによる実験結果による議論しか行われていない．これに対して，本研究では，本質的なパラメータを選択して，系の呼損率を理論的に計算する手法について検討を行い，この手法を用いて上記の問題がどの程度改善されるのか，を明らかにすることを主目的とする．本研究の最終的な目的は，これらの検討によってアドホックネットワーク設計理論体系の構築を行うことにある．

セルラーネットワークは，バックボーンネットワークと基地局とで構成される（図1.1）．基地局は自分を中心とするひとつの領域（セル）をカバーし，セルの中に在る移動端末に対してサービスを提供する．ある二つの移動端末 M_1 ，M_2 の間の通信は，M_1 が属するセルの基地局 B_1 を経由し，更に M_2 が属するセルの基地局 B_2 を経由して，相手移動端末 M_2 に伝えられる．基地局 B_1 と B_2 との間の通信は，通常，地上の有線ネットワークであるバックボーンネットワークによって実現される．セルラーネットワーク方式では，無線によって通信が行われる区間は，基地局と移動端末との間の一段（1ホップ）通信だけである．移動端末は，基地局との間での通信だけをおこなう能力を持っている．

図 1.1: セルラネットワーク

図 1.2: アドホックマルチホップネットワーク

一方アドホックマルチホップネットワークは，それを構成する移動端末自身が中継能力を持っており，

1. 基地局とそれらを結ぶバックボーンネットワークに依存しない，
2. 移動端末は互いに対等で自律分散的に動作する，
3. 移動端末同士が無線通信により直接情報を交換する，
4. 直接情報を交換できない移動端末同士も，途中の端末が中継することにより，情報交換が可能，

などの特長を持つ [7][8].

アドホックネットワークは，基地局設備やバックボーンネットワークを期待することができない地域や，戦場，これらの設備が破壊された広域災害現場での通信路確保という応用が考えられていたが，近年では，自動車ネットワーク [9] やコンピュータを持つもの同士が一時的に集まって構成されるコンピュータネットワーク，多数のセンサーが空間に配置され互いに通信して情報を伝達するセンサーネットワーク [10, 11] などが応用として検討されている.

最近，セルラネットワークとアドホックマルチホップネットワークの両方式を統合したネットワーク方式が検討されている．このようなネットワーク方式を本研究ではアドホックセルラネットワークと呼ぶ．

例えば，[12] は，ある限られた空間の中で協調的作業を行うロボットの間での通信を検討している．そこでは，直接通信が可能な距離内にいるロボット同士は直接通信し，直接通信が不可能なロボット同士は基地局を介して通信する．[14] は構内電話など，端末間で直接通信が行われる機会が多いと考えられる環境で，アドホックセルラシステムのアクセスプロトコルを検討している．また，[15] はセルラネットワークで生じるデッドスポット問題を，アドホックネットワークの中継能力を用いて解決するシステムを提案している．

1.2 研究の目的

以上の背景を元に，本研究ではアドホックセルラネットワークの通信トラヒック特性を，理論的に計算する方法を検討する．従来の研究 [12][14][15] では，アドホックセルラネットワークの通信トラヒック特性はそれぞれの状況に応じたシミュレーションを行うことで検討されている．これに対して，本研究では簡明なモデルを提示し，システムの呼損率を計算する理論的手法を提示する．

理論的計算方法を用いることにより，さまざまな条件下でのネットワーク特性の計算を繰り返し，簡便に実行することができ，アドホックネットワークの適用可能性などを検討することが可能になる．

本研究で取り上げるアドホックセルラネットワークは，次のの二種類である．

1. 端末間直接通信が可能なセルラネットワーク
2. 端末が中継能力を持つセルラネットワーク

(1) 端末間直接通信を用いたセルラネットワーク方式

端末間の直接通信が可能なセルラネットワークを，直接通信ネットワークあるいは二段ワイヤレスネットワークと呼ぶ．これは，セル内の近接した移動端末同士には相互に直接に通信することを許し，距離があるために直接通信ができない呼は基地局が中継するネットワークである．直接通信は一段の接続で実現することができ，基地局が中継する呼は，移動端末から基地局，基地局から相手移動端末という２段の接続で通信をおこなう．最大２段で通信できることから直接通信ネットワークを「二段ワイヤレスネットワーク」とも呼ぶ．また，直接通信ネットワークに対比して，従来型のセルラネットワークを「純粋セルラネットワーク」と呼ぶ．

本研究で直接通信ネットワークの検討を行う１つの目的は，チャネル資源の使用効率を解析することである．上り回線，下り回線一組を，一個のチャネルと考える．同一セル内の２つの移動端末が，基地局を介して通信を行うと，２チャネルを消費する．これに対してその二つの端末が近接しているときに，直接通信を行うことができれば，１チャネルを消費するだけでよい．このことから，端末間の直接通信が可能なセルラネットワークでは，チャネル資源をより有効に利用できると考えられる．具体的には，系の呼損率を小さく抑えることができると考えられる．[12, 13] や [14] が多くのパラメータを考慮してコンピュータシミュレーションによって系の性能を評価しているが，本研究では本質的なパラメータを選択してこのようなネットワークをモデル化し、ネットワークの呼損率を理論的に計算することを目指す．本研究では呼損率を解析するのに、セルのサイズ、ノードの通信半径、セルの中での通信密度、およびトラヒックフローの挙動をパラメータとして用いる．この解析では，ノードの空間的分布を考慮する．さらに，この論

文では直接通信ネットワークで運ばれる呼量を定義する．この運ばれた呼量は上で述べた手法で計算された呼損率から計算することができる．

直接通信ネットワークを検討する第2の目的は，このネットワークでのチャネル使用の効率を向上させることができる「範囲」について考察することである．直接通信はいかなる状況においても有効なものとは限らない．セルで生じるトラヒックにはセル外のノードとの通信と，同一セル内での通信の2種類がある．この2種類の呼の比率によっては，直接通信が必ずしも大きな効果をもたらさない場合がある．

この研究では，セルで発生する通信のうちセル外との間で行われる通信の通信量をパラメータとし，直接通信が効果を持つような，セル外の通信量の範囲を求める方法を示す．この範囲を見つけるための評価の尺度として，本研究では，直接通信ネットワークで運ばれる呼量と，純粋セルラーネットワークでの運ばれる呼量の比を用いる．直接通信ネットワークで運ばれた呼量は本研究で導く呼損率から計算することができる．純粋セルラーネットワークの運ばれた呼量は，通常はErlang-B式で与えられる呼損率から計算するが，本研究では基地局が中継する呼についての配慮が必要であるから，これについても新しい計算式を提案する．

(2) 端末が中継能力を持つセルラネットワーク

本研究で議論するもう1つのアドホックセルラネットワークは「端末が中継能力を持つセルラネットワーク」である．このネットワークを「アドホックリレーネットワーク」とも呼ぶ．このネットワークは，いわゆるデッドスポット問題によるエリアカバレッジの低下を防ぐことを目的としたものである．

セルラネットワーク方式の問題点の一つに，セル内に存在する端末が障害物等

図 1.3: 直接通信ネットワーク

の影響により基地局と通信できないということがある．このような場所をデッドスポットと呼び, この問題をデッドスポット問題と呼ぶことにする．アドホックリレーネットワークは，デッドスポットに存在する端末と基地局の間の通信経路をアドホックネットワークの第４の特長である中継機能によって形成し，デッドスポット問題を解消しようとする試みである [15]．これによってデッドスポットにある端末も通信が可能となる場合が在り，実質的にエリアカバレッジを増大させることができる．

アドホックリレー方式が実現した場合に，もたらされる効果について，[15] は，シミュレーションを行って，系全体のスループットの改善がもたらされることを示した．これに対して，本研究でのアドホックリレー方式検討の第１の目的は二段 (two-hop) だけの中継によって、どの程度の通信トラヒックの改善が見込めるのかを，理論解析により明らかにすることにある．理論的手法により，端末間直接通信の通信距離，デッドスポットの存在確率などのパラメータを変更して，容易に通信トラヒックを計算することができる．提案するモデルでは，基地局からの距離に応じてデッドスポットの存在確率を設定することができる．また，基地局から見て端末がデッドスポットに入るのと同様に，端末間の通信の際にも互いに相手がデッドスポットに入ることがあるから，端末間の通信にもデッドスポットの存在を仮定する．端末間の直接通信が可能な距離をパラメータとして，システムの呼損率を計算する方法を示す．

本研究でのアドホックリレー方式検討の第２の目的は，二段に限らず三段以上の多段の中継を行うことの効果を明らかにすることである．この目的のために多段中継シミュレータを作成し，３段以上の中継を許したときの，呼損率を求めた．その結果，端末がデッドスポットに存在する確率が小さければ、三段以上の中継

図 1.4: アドホックリレーネットワーク

を行った場合，二段中継だけを行う場合ほとんど同じ呼損率になることを明らかにする．このことは，二段までを考慮した解析法で，多段中継のトラヒック特性を推定することができることを示している．あるいは，別の表現をすると，アドホックリレー方式を実現するとき，多段の中継能力を装備することは必要なく，二段中継の能力だけで十分であることを示している．

以上述べた事柄をまとめると，本研究では，二つの種類のアドホックセルラネットワーク，(1) 端末間直接通信が可能なセルラネットワーク，(2) 端末が中継能力を持つセルラネットワーク，のそれぞれ通信トラヒック特性を理論的に計算する方法を明らかにする．

直接通信ネットワークに関しては，このようなネットワークにおける通信トラヒック特性を，幾何学的確率と多元トラヒックモデルを用いて理論的に計算する方法を与える．いくつかの計算例によって，直接通信の導入で系の呼損率を純粋セルラネットワークに較べて三分の一程度に小さくできることを示す．また，直接通信を行うことの有効性の指標を，直接通信ネットワークが運ぶ呼量と純粋セルラネットワークが運ぶ呼量の比を用いて定義し，呼全体の中での同一セル内通信の割合によって，この指標を計算する手法を示す．端末間直接通信の運用に先立ってこのような評価を行う際に本提案手法は有効であると考えられる．

端末に中継能力を持たせたネットワークでは，二段中継までを行った場合の，系の呼損率を与える理論式を示す．ここでもやはり幾何学的確率と多元トラヒックモデルを用いる．計算例では，端末間の通信距離が比較的小さい場合でも，系の呼損率を数分の一に減少させることが可能であることを示す．また，二段中継にとどまらず複数の端末が中継にかかわる多段中継を実現した場合の呼損率をシミュ

レーションによって評価し，多段の中継は二段中継に比べて必ずしも呼損率を改善しないことを明らかにする． これは，多段中継を行った場合の通信トラヒック特性は，二段中継の場合の通信トラヒック特性とそれほど変わらないということを意味するため，上記の解析手法を用いて，多段中継を行った場合の通信トラヒック特性の推定も行うことができると考えられる

1.3 研究の概要

本研究は，アドホックセルラシステムの通信トラヒック特性を理論的に明らかにする基礎的な研究であり，図1.5に示すような構成となっている．第２章では直接通信ネットワークのモデルと理論的解析手法を議論し，具体的な計算例とシミュレーション結果を用いて，考察をおこなう．第３章ではアドホックリレーネットワークのモデルとその解析手法を議論し，具体的な計算例とシミュレーション結果を用いて議論と考察をおこなう．

以下に，各章の概要を示す．

第１章「序論」は本研究の背景と目的，研究概要について述べる．

第２章「直接通信ネットワークの通信トラヒック特性の解析方法」では，近接した移動端末同士が通信するとき，基地局が中継することなしに端末間で直接に通信することを許す直接通信ネットワークの通信トラヒックを解析する方法を示す．基地局による中継はセルの回線資源を２チャネル使用するから，全ての通信を基地局が中継すると，セルの回線資源利用を圧迫する．端末同士が直接通信すれば，１チャネルを消費するだけで通信を実現することができ，系の回線資源を有効に利用することができる．

この章では，直接通信ネットワークの位置づけとそのモデルを示し，系の呼損率を計算する方法を示す．ここでは，幾何学的確率と二元トラヒックモデルを用いて系の呼損率を計算する．また，直接通信ネットワークの適用によって，従来のセルラネットワークに比べて系の性能を向上させることができると考えられるが，その効果が得られるための条件について検討する．

さらにこの章では，提案した計算方法によるいくつかの計算例を示し，それがシミュレーションの結果とよく一致することを示す．

また，直接通信ネットワークが有効になるのは，セルの中で発する呼のうち，同一セル内の通信がある割合を占める場合に限られると考えられる．セルラーネットワークに対して，直接通信ネットワークが性能向上をもたらすようなセル内通信の割合を議論するための評価尺度を提案し検討する．

第３章「アドホックリレーネットワークの通信トラヒック特性の解析」では，デッドスポット問題をとりあげ，アドホックリレー方式のモデルを示して，その解析手法を述べる．セルラ方式では全ての通信が基地局を介して行われるが，端末が建物の陰のなどのデッドスポットに入った場合，基地局と通信することができなくなることがある．この章では，このような場合に，デッドスポットに入った端末と基地局との間の通信を別の端末が中継するアドホックリレー方式を検討し，二段中継を行った場合のトラヒック特性を表す理論式を導く．ここでも二元トラヒックモデルを用いて呼損率の計算を行う．この理論式の計算例から，端末の通信能力が比較的小さな場合でも，アドホックな中継により呼損率が改善され，運ばれる呼量も改善できることを示した．この解析結果はシミュレーションとも非常によく一致することを示した．

さらに，シミュレーションによって三段以上の多段の中継を行うことの効果を明らかにした．端末がデッドスポットに存在する確率が小さければ、三段以上の中継を行った場合でも，二段中継だけを行う場合とほぼ同じ呼損率が得られ，二段までを考慮した解析法で多段中継のトラヒック特性を推定することができることを示した．

第４章 「結論」では，以上の各章の結果をまとめ，今後の課題について述べる．

第１章
序論
第２章
直接通信ネットワークの通信トラヒック特性の解析方法
第３章
アドホックリレーネットワークの通信トラヒック特性の解析
第４章
結論

図 1.5: 本研究の構成

参考文献

[1] B.H.Walke "Mobile Radio Networks – Networking, Protocols, and Traffic Performance" Second Edition John Wiley & Sons, Ltd. 1998

[2] Yi-Bin Lin and I. Chlamtac, Wireless and Mobile Network Architectures, John Wiley & Sons, 2001.

[3] F. Adachi and N. Nakajima, "Challenges of Wireless Communications – IMT-2000 and Beyond –", IEICE Trans. Fundermentals, Vol.E83-A, No.7, pp.1300-1307, July 2000

[4] J.C. Haartsen and S. Mattisson, "BLuetooth – A New Low-Poer Radio Interface Providing SHort-Range Connectivity", Proceedings of the IEEE, Vol.88, No.10, pp.1651-1611, October 2000

[5] M. Weiser, "Ubiquitous computing", IEEE Computer, October 1993, pp.71-72

[6] 山尾康，梅田成視，大津徹，中嶋信生，"第 4 世代移動通信の展望 – 無線システムを中心とした課題について –" 電子情報通信学会 論文誌B Vol.83-B, No.10, pp.1364-1373, 2000 年 10 月

[7] 間瀬憲一，中野敬介，仙石正和，篠田庄司，"アドホックネットワーク" 電子情報通信学会誌, vol. 84, no. 2, pp. 127-134, 2001 年 2 月.

[8] C. E. Perkins, "Ad hoc Networking", Addison-Wesley, 2001.

[9] F.Kojimam, H.Harada, M.Fujise "Inter-Vehicle Communication Network with an Autonomous Relay Access Scheme" IEICE Trans. Commun., Vol.E84-B, No.3, pp.566-575, March, 2000

[10] G.J.Pottie and W.J.Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors" Communications of the ACM, Vol.43, No.5, pp.51-58, May 2000

[11] K. Shorabi, J. Gao, V. Ailawadh, and G.J.Pottie, "Protocols for Self-Organizztion of a Wireless Sensor Network, IEEE Personal Communications, pp.16-27, October 2000

[12] T. Adachi and M. Nakagawa, "A Study on Channel Usage in a Cellular·Ad-Hoc United Communication System for Operational Robots," IEICE Trans. Commun., vol. E81-B, no.7, pp.1500-1507, July 1998.

[13] T.Adachi and M.Nakagawa, "A Handoff Examination of a Hybrid System Using Cellular and Ad-hoc Modes" IEICE Trans. Commun., Vol.E83-B, No.11, pp.2494-2500, 2000

[14] 飯田登，深川周和，水野忠則，渡辺尚，"端末間直接通信を考慮した無線多重アクセスプロトコル" 電子情報通信学会論文誌 Vol.J82-B, No.7, pp.1347-1356, July 1999.

[15] G. N. Aggelou and R. Tafazolli, "On the Relaying Capability of Next-Generation GSM Cellular Networks," IEEE Personal Communications, pp.40-47 (Feb. 2001)

[16] 秋丸春夫, 川島幸之助 「情報通信トラヒック–基礎と応用–」電気通信協会, オーム社 1990

第2章　直接通信ネットワークの通信トラヒック特性の解析

概要

セルラネットワークの概念とアドホックネットワークの概念と両方を性質を備えたワイヤレスネットワークシステムを提案する．セルラネットワークシステムにおいて二つのノードの間の通信は基地局の中継機能によって保証されている．しかしながら，2つのノードが同一セルに属しているときには，基地局による中継はひとつの通信あたり回線資源を2チャネル占有することなり，セルのトラヒック特性を悪化させる．本章で検討するシステムは二つのノードはその間の距離が小さいときには互いに直接通信する．このようなシステムを直接通信ワイヤレスネットワークと呼ぶことにする．このネットワークのトラヒック特性はさまざまなパラメータ，セルの大きさ，ノードの位置，ノードの通信半径，チャネル割り当ての方式などに依存する．この種のネットワークのトラヒック特性は従来コンピュータシミュレーション手法によって評価されてきたが，本章の主たる目的は，簡明なモデルを用い，理論的にトラヒック性能特性を解析する方法を与えることである．本章ではこのモデルを用いて解析を行う方法を示す．さらに本章では直接通信ネットワークが有効に働く範囲をチャネルの有効利用の観点から考察する．

2.1 はじめに

セルラモバイル通信システムにおいては，そのサービスエリアはたくさんのセルによって覆われている [1]．セルの中心にはひとつの基地局が設置される．あるノードがこのセルの中にあるとき，このノードはセルの基地局と直接通信する．各セルの基地局はバックボーンネットワークに接続されており，ノードは基地局とバックボーンネットワークを介してサービスエリアの任意のノードと通信することができる．逆に全てのノードは基地局を介して通信を行っている．このように，セルラ通信の考え方は，信頼性のあるモバイル通信環境を実現している．その結果，この考え方はほとんどすべての地上モバイル通信システムネットワークに応用されている．

一方，モバイル通信の新しい考え方が検討されている．アドホックネットワーク [2]-[6] は，そのような考え方の一つである．アドホックネットワークにおいては，ひとつのノードが他のノードと直接に通信することができる．この点でノード同士が直接に通信し合うことがないセルラシステムとは対照的である．さらにあるノード群を中継局として働かせて，それを介して二つのノードが通信することができる．この能力を用いることによりノードにルーティング機能を持たせ，ノードだけで構成されるネットワークを実現することができる．アドホックネットワークの技術はコンピュータネットワークやセンサーネットワーク，自動車ネットワークなどに応用することができる [3, 4, 5]．

セルラの考え方とアドホックの考え方の両方を導入したネットワークも考察されている [7, 8, 9]．図 2.1 にその例を示す．これらのシステムにおいてはバックボーンネットワークに接続された基地局がサービスエリアの中に設置され，一つ一つのセルの中心として動作する．サービスエリア全体は複数のセルによって覆われ

る．さらに，ひとつのセルの中の２つのノードの間の通信も，基地局の中継能力によって保証されている．これに加えて，二つのノードが十分に近い場所に在る時には，ノードのアドホックネットワーキング能力によって，ノード同士が直接に通信する．このことは，あるノードは他のノードと，基地局を介して，または基地局とバックボーンネットワークを介して，または直接に通信するという３通りの方法で通信することを意味している．このシステムを直接通信ネットワークと呼ぶ．なお，直接通信ネットワークに対比させて，従来型のセルラネットワークを純粋セルラネットワークと呼ぶことにする．

直接通信ネットワークにおいて，基地局が同一セル内のノードの間の中継を行うときにはホップ数は２段である．直接通信が行われるときのホップ数は１段である．本章ではノードが中継機能を持つことは考慮しない．それゆえ，このシステムにおいてはノード間のコミュニケーションのホップ数は常に２以下である．我々はこのようなシステムを二段ワイヤレスネットワーク (Two-hop wireless network) とも呼ぶ．

[7] において，セルラシステムにアドホックの概念を導入することは，周波数帯域の効率的な利用という観点から効果的であるとされている．ひとつのセルの中の二つのノードが通信する場合を考える．この二つのノードが基地局を経由して通信する場合，それぞれのノードが基地局と通信するための上りリンクと下りリンクを必要とする．上りリンク，下りリンクの一組をあわせてチャネルと呼ぶことにすると，基地局を経由したノード間での通信のために２チャネルが必要である．一方，二つのノードが直接に通信するときには，必要なチャネルは１チャネルだけである．それゆえ，アドホック通信の概念を導入することによって直接通信がおこなわれれば，純粋セルラネットワークよりも周波数資源が効率的に使われる

ことになる．

本章の第１の目的はアドホックの考え方とセルラの考え方の両方を用いたネットワークにおいて、チャネル資源の使用効率を解析することである．端末と端末との間の直接通信をセルラシステムに導入したときの性能向上に関しては、[7][8]や[9]が多くのパラメータを考慮してコンピュータシミュレーションによって評価している．本章では本質的なパラメータを選択してこのようなネットワークをモデル化し、ネットワークの呼損率を理論的に計算することを目指す．本章では呼損率を解析する際に、セルのサイズ、ノードの通信半径、セルの中での通信密度、およびトラヒックフローの挙動をパラメータとして用いる．この解析では，ノードの空間的分布を考慮する．さらに，この章では直接通信ネットワークで運ばれる呼量を定義する．この運ばれた呼量は上で述べた手法で計算された呼損率から計算することができる．

本章の第２の目的は直接通信ワイヤレスネットワークにおいてチャネル使用の効率を向上させることができる「適用範囲」について考察することである．[9]に述べられているように，直接通信ワイヤレスネットワークの性能が向上するか否かは，トラヒックフローの振る舞い，すなわち同一セル内の通信量とセル外との通信量の比，に依存すると考えられる．ここでは，３つの種類のトラヒックフローを考える．第一のトラヒックフローは同一セル内のノード間のフローである．第二は異なるセルに属するノード間のトラヒックフローである．第三はあるセルに属するノードから他のネットワーク，たとえば固定網，に属するノードとの間のトラヒックフローである．同一セル内の二つのノードが基地局を介して通信すると，２チャネルを使用する．異なるセルに属する二つのノードの間の通信は，それぞれのセルにおいて１チャネルを使用し，セル中のノードと異なるネットワーク

に属するノードとの間の通信は，自分が属するセルにおいてやはり１チャネルを使用する．このことから，同一セル内のノード間の通信量が第2，第3のトラヒックフローの和に較べてあまり大きくなければ，直接通信を導入することによって１チャネルの使用だけで通信をする仕組みを導入しても，その効果を期待できないと考えられる．それゆえ，アドホックネットワーキングを適用しようとするとき，実際のシステムに適用する前にその効果が得られるか否かを検証する必要がある．この検証のためには，直接通信ワイヤレスネットワークが，チャネル利用効率を向上させる適用範囲を確かめることが重要な課題である．この章では，この適用範囲を見いだす方法について議論する．この適用範囲を見つけるために本章では直接通信ネットワークの運ばれた呼量と，純粋セルラネットワークでの運ばれた呼量とを比較する．直接通信ネットワークの運ばれた呼量は上に述べた方法で計算することができる．純粋セルラネットワークの運ばれた呼量の計算は，通常，Erlang-B 式で与えられる呼損率を用いて行われる．しかし，本章では基地局が中継する呼についての配慮が必要であるから，新しい評価式を導入する．

図 2.1: セルラ方式とアドホック方式の併用システム

2.2 直接通信ワイヤレスネットワークモデル

本章では，円形のセルを考える．基地局はこのセルの中心に置かれる．この円形のセルの中に存在する全てのノードは基地局と直接に通信できるものとする．本章では，回線交換をおこなう即時式の系 (Loss System) を考える．図.2.2 に直接通信ワイヤレスネットワーク (two-hop wireless network) のモデルを示す．この図において BS は基地局であり，半径 R の円は一つのセルを表す．MS_0, MS_1 および MS_2 はそれぞれノードである．一つのノードが他のノードと直接通信することができる通信範囲は半径 D の円内であるとする．基地局の送受信能力はノードの能力よりも大きいのが普通であるから，ノードの通信半径 D はセルの半径 R より小さいものと仮定する．例えば図 2.2, において，ノード MS_0 がノード MS_1 と通信しようとしたとき，この二つのノード間距離は D より小さいから，二つのノードは直接に通信することができる．一方，MS_0 から MS_2 への距離は D より大きいから，MS_0 は MS_2 とは基地局 BS に中継してもらって通信することになる．

セルのチャネル数を n であらわす．直接通信はチャネルを一つだけ使用し，基地局 BS を経由する端末間の通信である二段通信は，セルのチャネルを二つ使用するものと仮定する．さらに，このセルの中のノードと他のセルの属するノードとの間の通信は，このセルの回線を一つ使用すると仮定する．簡単のために，呼が始まった後は，ノードは移動しないものと仮定する．この系の通信トラヒック特性は，資源に対する複数種類の要求，セルの大きさ，ノードの通信半径，ノードの分布，セルの中での通信密度，トラヒックフローの挙動などに依存すること考えられる．以下において，直接通信ワイヤレスネットワークの通信トラヒックを解析する方法を述べる．

図 2.2: 直接通信ワイヤレスネットワーク (two-hop wireless network) のモデル円形セルとノードの通信範囲

2.3 直接通信ワイヤレスネットワークのトラヒック解析

2.3.1 トラヒックの密度

セルの中で発せられる呼について考察する．呼は二つの種類に分類することができる．一つはそのセルの中のノード間の通信であり，他方はそのセルの中のノードとそのセルの外のノードとの間の通信である．第一の種類の呼と第二の種類の呼はそれぞれランダムに独立に生起するものとする．また，第一の種類の呼は到着率 λ_a のポアソン過程に従い，第二の呼は到着率 λ_b のポアソン過程に従うものとする．このように仮定すると，セルの中で生起する呼は全体として到着率 $\lambda_a + \lambda_b$ のポアソン過程に従う [12].

系での呼の到着率 λ は，上の 2 種類の到着率の和であり，$\lambda = \lambda_a + \lambda_b$ と定義する．到着率 λ_a および λ_b はセルの中に存在するノードの数とセルの外のノードとのあいだのトラヒックフローの挙動に依存すると考えられるが，本章では，λ_a および λ_b は所与の定数であると仮定する．呼の保留時間は平均 $1/\mu$ の指数分布に従うものと仮定する． $a = \lambda/\mu$ と定義する．

ノードはセルの中にランダムに，互いに独立に分布しているものと仮定する．あるセルの中に存在する二つのノードを考える．この二つのノードの間の距離は確率変数であると考えて，この確率変数を X と書き表す．この章では半径 R の円形セルを考えているから，二つのノード間の距離が x 以下である確率を次のように表すことができる [10][11]:

$$
\begin{aligned}
&P\{X \le x\} \\
&= \frac{2x^2}{\pi R^2}\arccos\frac{x}{2R} + \frac{2}{\pi}\arcsin\frac{x}{2R} - \frac{2R^2x + x^3}{2\pi R^3}\sqrt{1-\left(\frac{x}{2R}\right)^2} \qquad (2.1)
\end{aligned}
$$

図 2.3: 二つのノードの間の距離が x 以下である確率.

図2.3 は $P\{X \leq x\}$ をあらわしている．ここで $R = 100$ である．$p = P\{X \leq D\}$ と定義する．このとき p は，同一セル内のノード間の呼が二段通信を必要とせず，1 チャネルしか使わない確率である．

参考文献 [12] においては，到着率 λ のポアソン過程が考察されている．到着にはそれぞれ二つの色 c_1 と c_2 でランダムに色をつけられるとして，ある到着が色 c_i をつけられる確率が p_i で，どの色がつけられるかは独立であるとする．この場合，色 c_i がついた到着は到着率は $p_i\lambda$ のポアソン過程である．

この直接通信ワイヤレスネットワークモデルにおいて，セルの中に在る二つのノードの間の通信は，到着率 λ_a のポアソン分布にしたがって生起する．直接通信は色 c_1 に対応し，二段通信は c_2 に対応しているものと考える．呼が直接通信を行

うか，あるいは二段通信を行うかは互いに独立であるから，直接通信を要求する呼は密度 $p\lambda_a$ のポアソン過程に従い，二段通信を要求する呼は密度 $(1-p)\lambda_a$ のポアソン過程に従う．直接通信の到着率を λ_c と書き，二段通信の到着率を λ_d と書くと，次のような関係を得る：

$$\lambda_c = p\lambda_a \tag{2.2}$$

$$\lambda_d = (1-p)\lambda_a \tag{2.3}$$

図 2.4 は，横軸を D として， λ_c と λ_d との関係を示している．このグラフは，$\lambda_c + \lambda_d = \lambda_a = 7.2$, $R = 100$ という条件のもとで計算したものである．

2.3.2 呼の処理規則

この章では呼の処理規則 (Call Admission Policy) を次のように考える．セルでの呼それぞれは， n 個のチャネルのどれを用いても良い．二段通信を必要とする呼は空きチャネルが２つ以上あるとき，受理される． 直接通信を行う呼は，空きチャネルが一つあれば，受理される．同様にしてあるセルの中のノードと，他セルに属するノードとの間の通信は，一つ以上の空きチャネルがあれば受理される．これら以外の場合，呼は呼損となる．なんらかの種類の呼を優先するような規則は置かない．次節ではこの処理規則に従う直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率を計算する方法を示す．

2.3.3 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率

まず，直接通信ワイヤレスネットワークより一般的なシステムについて考察する．１チャネルを必要とする呼の集合を G_1 で表す． m チャネルを必要とする呼

の集合を G_2 で表す．G_1 の呼の到着は密度 λ_1 のポアソン過程に従い，G_2 の呼の到着は密度 λ_2 のポアソン過程に従うものと仮定する．同一のリソースを共用する2種類以上の性質が異なる呼が存在する場合のトラヒックモデルを多元トラヒックモデルと呼ぶ [13, 14, 15]．G_1 の呼の保留時間，G_2 の呼の保留時間はそれぞれ平均 $\frac{1}{\mu_1}$，$\frac{1}{\mu_2}$ の指数分布に従う確率変数であるものとする．

それぞれの種類の呼の呼量を

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}$$
$$a_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}$$

と書く．系のチャネル数は n であるとする．G_1 の呼は，系のチャネルのうち1チャネルでも空いていれば受け付けられ，G_2 の呼は n チャネルのうちの m チャネルが空いていれば受け付けられるものとする．平衡状態において，システムの中に G_1 の呼が i 個，G_2 の呼が j 個存在している確率を $P_{i,j}$ と表す．

このシステムにおいて，次のような関係式が成り立つ [15]:

$$P_{i,j} = \frac{a_1^i}{i!}\frac{a_2^j}{j!}P_{0,0} \tag{2.4}$$

$$P_{0,0} = \frac{1}{\sum_{j=0}^{s}\sum_{i=0}^{n-mj}\frac{a_1^i}{i!}\frac{a_2^j}{j!}} \tag{2.5}$$

ここで $s = [\frac{n}{m}]$ で，$[x]$ は x を越えない最大の整数とする．

B_1 および B_m をそれぞれ G_1 と G_2 の呼の呼損率としよう．B をシステム全体の平均呼損率とする．上の関係から B_1 および B_m は次にあげる式から計算することができる [15]:

$$B_1 = \sum_{j=0}^{s} P_{n-mj,j} = P_{0,0}\sum_{j=0}^{s}\frac{a_1^{n-mj}}{(n-mj)!}\frac{a_2^j}{j!} \tag{2.6}$$

$$
\begin{aligned}
B_m &= \sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=n-m(j+1)+1}^{n-mj} P_{i,j} + \sum_{i=0}^{k} P_{i,s} \\
&= P_{0,0} \sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=n-m(j+1)+1}^{n-mj} \frac{a_1^i}{i!} \frac{a_2^j}{j!} + P_{0,0} \frac{a_2^s}{s!} \sum_{i=0}^{k} \frac{a_1^i}{i!} \qquad (2.7)
\end{aligned}
$$

ここで $k = n \bmod m$ である．

このシステムでの平均呼損率は次のように定義されている [15]:

$$
B = \frac{a_1 B_1 + m a_2 B_m}{a_1 + m a_2} \qquad (2.8)
$$

この式の分子は実際に運ばれなかった呼量であり，分母は実際に加わった呼量である．上の式は，元来，G_2 に属する呼が G_1 に属する呼の m 倍の伝送速度を必要とするシステムの性能を解析するために用いられたものである．従って，G_2 の呼が失われたときには G_1 の呼の m 倍の呼量が失われたものと考えている．このために上の平均呼損率の式にはパラメータ m が現れている．

我々の目的は直接通信ワイヤレスネットワークでの呼損率を計算することである．B_1 を通信に 1 チャネル要求する呼の呼損率とし，B_2 を通信に 2 チャネル要求する呼の呼損率をしよう．B_1 と B_2 は，上の式に以下のパラメータを代入することで直接得ることができる：$m = 2$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ で

$$
\lambda_1 = \lambda_c + \lambda_b = p\lambda_a + \lambda_b \qquad (2.9)
$$

$$
\lambda_2 = \lambda_d = (1-p)\lambda_a \qquad (2.10)
$$

ここで

$$
\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 = \lambda_a + \lambda_b \qquad (2.11)
$$

であって p は上で述べたように R と D の関数である．

上で述べた一般的なシステムでは，λ_1 は λ_2 とは独立なものであったが，直接通信ワイヤレスネットワークにおいては λ_1 と λ_2 とは互いに依存関係にある．それゆえ，直接通信ワイヤレスネットワークの B_1 と B_2 とは，一般的なシステムの特殊な場合と考えてよい．

平均呼損率を計算するとき，本章では一般的なシステムとは若干異なる定義を与える．一般の場合 m チャネルを一まとめにして用いて，1 チャネルが運ぶ情報量の m 倍の情報を運んでいる．それ故 m が平均呼損率を与える式 (2.8) の中に現れている．それに対して直接通信ワイヤレスネットワークの場合には，ノード間の通信に m チャネルを用いても，1 チャネルの場合と同じ情報量しか運ばない．それゆえ，直接通信ワイヤレスネットワークの場合には，セルにおける呼損率は次の式で与えられる．

$$B = \frac{a_1 B_1 + a_2 B_2}{a_1 + a_2} \tag{2.12}$$

この式は m を含んでいない．この場合実際に運ばれた呼量は次のように考えられる．

$$a_{c,twohop} = a_1(1 - B_1) + a_2(1 - B_2) \tag{2.13}$$

図 2.4: 呼の到着率と D との関係．ここで λ_c は直接通信の到着率，λ_d は二段通信の到着率である．

2.4 直接通信ワイヤレスネットワークの適用範囲

セルラシステムにアドホックネットワーキングを導入することによって，近接している二つのノードは直接通信することができる．同一セル内のノード間の通信でも基地局を経由して２チャネルを用いて行われていた呼が，直接に１チャネル使用しただけで実現するのであるから，チャネルの利用効率が向上することが期待できる．しかしながら，異なるセルに属するノード間の通信はそれぞれのセルにおいては，1 チャネルだけしか必要としない． $\lambda = \lambda_a + \lambda_b$ が一定だと仮定する．もし λ_b が λ に比べて大きく，すなわち，セル間の通信の頻度が大きいときには，2 チャネルを必要とする呼の数が少ないのであるから，直接通信を行うことがシステムのパフォーマンスを向上させる度合いはさほど大きくはないであろう．それ故，直接通信をセルラシステムに適用することの効果は， λ に対する λ_b の比によって定まるある限られた範囲でだけ，有効である．この範囲外では，アドホックネットワーキングはもはや有効ではないのだから，この範囲を明らかにすることは重要な課題である，この範囲外では，本来のセルラシステムを用いれば十分である．以下では，この有効範囲について考察する．

本章では直接通信ワイヤレスネットワークの能力と純粋セルラシステムの能力とを比較し，アドホックネットワークが効果的であるような範囲を求める．ここで純粋セルラシステムとは，アドホックネットワークの概念を持ち込まない，本来のセルラシステムをいう． $a_{c,pure}$ で純粋セルラネットワークで運ばれる呼量をあらわす． $a_{c,twohop}$ と $a_{c,pure}$ との比を比較の尺度として用いる． ある定数 $\beta(\geq 1)$ として，もし，

$$\frac{a_{c,twohop}}{a_{c,pure}} > \beta \tag{2.14}$$

ならば，直接通信ネットワークによって運ばれる呼量は純粋セルラネットワーク

によって運ばれる呼量より大きく，アドホックネットワーキングが効果的であると考えることにする．

前の節で述べた方法を用いて，$a_{c,twohop}$ 運ばれた呼量 を計算することができる．以下では純粋セルラシステムの呼損率と運ばれた呼量について考える．各パラメータの定義は直接通信ワイヤレスネットワークの場合と同じである．$\lambda_b = 0$ であるから，この系の呼損率はアーランＢ式を用いて以下のように容易に計算することができる．

$$B = \frac{\frac{a^{n'}}{n'!}}{\sum_{r=0}^{n'} \frac{a^r}{r!}} \tag{2.15}$$

ここで $a = \lambda_a/\mu$ で $n' = [n/2]$ である．この場合には運ばれた呼量は以下のように計算することができる．

$$a_{c,pure} = a(1 - B) \tag{2.16}$$

$\lambda_b \neq 0$ の場合には，純粋セルラネットワークの呼損率をアーランＢ式で計算することはできない．その理由は以下のとおりである：もし $\lambda_b \neq 0$ であるならば，ある呼はセルの中のノードと別のセルの中のノードとの通信を行う呼であり，そのような呼はこのセルの中では一つのチャネルしか用いない．一方，一つのセルの中の二つのノードの間で行われる呼はそのセルで二つのチャネルを必要とする．$\lambda_b \neq 0$ の場合にはこのような二種類の要求があるので，呼損率をアーランＢ式で計算することはできず，前の節で述べた式を用いて計算しなければならない．異なるセルに属するノード間の呼，および，異なるネットワークに属するノードとの間の呼の呼損率は，式 (2.6) で定義した B_1 で与えられる．一つのセルの中のノード間の呼に関する呼損率は式 (2.7) で定義した B_2 で与えられる．計算時には以下のパラメータを用いる：$m = 2$, $\lambda_1 = \lambda_b$, $\lambda_2 = \lambda_a$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, $a_1 = \lambda_b/\mu$ および

$a_2 = \lambda_a/\mu$.

もし $\lambda_b \neq 0$ ならば，実際に運ばれた呼量は次の式で定義される．

$$a_{c,pure} = a_1(1 - B_1) + a_2(1 - B_2) \tag{2.17}$$

これらの式を用いることにより，たとえ $\lambda_b \neq 0$ であっても，$a_{c,pure}$ を計算することができる．この計算の結果を用いて，チャネルの有効利用の観点から，ある与えられた環境の下でアドホックネットワーキングが効果的であるかどうかを調べることができる．

2.5 計算結果と議論

2.5.1 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率

この節では $\lambda_b = 0$ の場合の直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率の振る舞いを検討する．この場合のトラヒックの流れは，一つのセル内に限られているものとする．このとき呼損率は，R, D, λ_a, μ および n にだけ依存する．

図 2.5 から図 2.10 までに，さまざまな条件の下でのシステムの呼損率の計算結果を図示する．セルの半径 $R = 100$ とし，端末の通信範囲 D を横軸にとって $0 < D < 100$ の範囲で D を変化させて呼損率を計算した結果を示した．2 チャネルを必要とする基地局を経由した呼の呼損率が，Two-hop と名づけたプロットであり，端末間で直接通信する 1 チャネルだけを用いる呼の呼損率のプロットには，Direct と名づけてある．

図 2.5 は，$R = 100$, $\lambda_a = 7.2$, $\frac{1}{\mu} = 1.5$ and $n = 30$ の時のシステムの呼損率の計算結果を示したものである．グラフの横軸は D である．ノード間の通信距離 D が非常に小さい範囲では，ほとんど全ての呼が二段通信で行われる．この場合の呼損率は 5% 程度である．ノード間の通信距離が $D = 80$ の時には，二段通信の呼損率は 1.3% であり，直接通信の呼損率はおよそ 0.6% 程度である．これらの結果はアドホック通信技術によって通信トラヒック特性が向上したことを示している．

図 2.9 には，$\lambda_a = 8.3$ でその他の条件は図.2.5. の場合と同一としたときの計算結果を示す．純粋セルラシステムで $\lambda_b = 0$ の時には，ノード間の全ての通信は 2 チャネルを必要とする．一方二段ワイヤレス通信では，直接通信は一つのチャネルだけを用いる．ノード間通信距離 D が大きくなると直接通信の呼の到着率が大きくなる．それ故，図 2.5 および 2.9. に示すような D と呼損率の関係が成り立つのである．

理論計算式の導出の正しさを確認するために，同じモデルに則ったシミュレータを作成した．図2.11にシミュレータの操作画面を示す．このシミュレータでは，チャネル数，呼の到着率，サービス率などを設定してシミュレーションを行うことができる．画面中央上のフレームには，シミュレーション途中の状態，継続している呼について端末位置，端末の通信範囲などを表示している．画面中央下のフレームには，チャネルの使用数がプロットされている．

図2.9には，理論値の計算結果（実線）とシミュレーション結果(点）とを合わせてプロットした．両者が良く一致しており，理論式の導出が正しく行われていることを示している．

チャネル数が $n = 31$ であり，$R = 100$, $\lambda_a = 8.3$ and $\frac{1}{\mu} = 1.5$ であるような場合の計算結果を図2.10に示す．これを図2.9の場合と比較して考察する．チャネル数が $n = 31$ の時と $n = 30$ とでは，違いは1チャネルだけであるのに特性はかなり異なる．図.2.10に示されるようにチャネル数 n が奇数である時の直接通信に関する呼損率は小さく，特に D が10から30の範囲で非常に小さい．二段通信は必ず二つのチャネルを用いるから，チャネル数が奇数であるときには，n チャネルのうちの一つのチャネルは常に，直接通信のために予約席としてとっておかれていることになる．従ってこの場合には直接通信に優先的にチャネルが割り当てられているように動作していることになる．

チャネル数が異なるいくつかの場合について，運ばれた呼量の特性を図2.12に示す．端末間通信距離 D が小さいときには，チャネル数 n が偶数ならば，n の時の特性は $n+1$ の時の特性に近い．このことは，n が奇数のときには，運ばれた呼量の特性が n と $n+1$ との間で大きな差があることを意味している．上で述べたように，n が奇数であるとき，呼損率の特性は n が偶数であるときのそれとは顕著に

異なる．この差異が図 2.12 に示した直接通信ワイヤレスネットワークの特性として現れている．n 個のチャネルが全て割り当てられているようなセルに一個のチャネルを追加したという状況を考えてみよう．n が奇数である場合，それが偶数であるときよりも，D が小さな範囲で，より大きな性能の向上があると考えられる．

2.5.2 直接通信ネットワークが効果的である範囲

この節では，直接通信ネットワークが効果的である範囲を求めるために，$\lambda_b \geq 0$ の場合の直接通信ネットワークで運ばれた呼量と純粋セルラシステムで運ばれた呼量との比較と行う．式 (2.13) と (2.17) とがそれぞれのシステムで運ばれた呼量 $a_{c,twohop}$ と $a_{c,pure}$ を与える．以下では，$a_{c,twohop}$ の $a_{c,pure}$ に対する比を考察する．図 2.13 は，$R = 100$, $\lambda = 7.2$. $\frac{1}{\mu} = 1.5$ and $n = 30$ の時の，比 $a_{c,twohop}/a_{c,pure}$ の計算例を示している．縦軸が比であり，横軸は λ_b すなわち，セル外と通信を行う呼の到着率である．$D = 20, 40, 60, 80, 100$ のそれぞれの場合についてプロットした．

この結果は端末の通信範囲 D が大きくなったときに，この比も大きくなる，すなわち直接通信ネットワークが運ぶ呼量が大きくなることを示している．D が大きくなると，一つのノードが直接通信できるノードの数は大きくなり，1 チャネルだけを用いる直接通信を要求する呼の数も大きくなる．結果的に図 2.13 に示すように，$a_{c,twohop}$ と $a_{c,pure}$ の比は D が大きくなったときにやはり大きくなる．

図 2.13 から，$a_{c,twohop}$ が常に $a_{c,pure}$ よりも大きいことが分かる．これは直接通信ワイヤレスネットワークが純粋セルラネットワークと基本的に同等の能力を持っていて，さらに，アドホックネットワークとしての能力によって運ぶ呼量が増大していることを示している．アドホックネットワークとしての側面がまったく使

われない場合であっても，すなわち端末の通信範囲 D が小さい場合でも，直接通信ワイヤレスネットワークは純粋セルラシステムと同等の性能を持っていると考えることができる．図 2.13 はいま述べたような特性を示している．

さらに，$\lambda_b = 0$ において性能向上があることをを図 2.13 に見ることができる．しかしながら，λ_b が増加したときに比 $a_{c,twohop}/a_{c,pure}$ は次第に減少し，最終的にこの比は 1 に近づく．たとえば，図 2.13 において，$\lambda_b = 5$ と $\lambda_b = 7.2$ の間で，この比はほとんど 1 に等しい．したがって，アドホックネットワーキングのためにノードが特別な装備をしたところで，この領域，すなわち，セル外通信の割合が $5/7.2 \approx 0.7$ を越えた領域では性能の向上を期待することはできず，アドホックネットワーキングを適用するべきでは無いと考えられる．図 2.14 においては，$6.5 < \lambda_b < 8.3$ の範囲で，この比はほとんど 1 に等しく，セル外通信の割合が $6.5/8.3 \approx 0.8$ を越えた領域では性能の向上を期待することはできない．

以上，述べたように，比 $a_{c,twohop}/a_{c,pure}$ をある基準値 β と比較することによって，アドホックネットワーキングを系に提供するべきか否かを判定することができる．基準値 β を前もって決めておき，計算した比 $a_{c,twohop}/a_{c,pure}$ がそれよりも大きければ，アドホックネットワーキングを適用するべきだ，と判定することができる．たとえば $\beta = 1.01$ としよう．図 2.13 を用いて，$D = 80$ の端末を用いるならば，呼の到着率が $0 \leq \lambda_b \leq 2.8$ の範囲でアドホックネットワーキングが効果的である，ということができる．ノードの直接通信距離 D が非常に小さいとき，たとえば $D \leq 20$ であるときには，直接通信ワイヤレスネットワークは効果的であるとはいいがたい．図 Fig.2.14 は $\lambda = 8.3$ に対する数値例を与えている．この場合には，ノードの直接通信距離 D が 80 であるとき，アドホックネットワーキングが効果的である範囲は $0 \leq \lambda_b \leq 4.6$ に広がる．

図 2.5: 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率:$\lambda_a = 7.2$

図 2.6: 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率:$\lambda_a = 6.7$

図 2.7: 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率:$\lambda_a = 7.7$

図 2.8: 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率:$\lambda_a = 8.8$

図 2.9: 直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率．シミュレーション結果も重ねてプロットしてある．

図 2.10: チャネル数が $n = 31$. であるときの直接通信ワイヤレスネットワークの呼損率.

図 2.11: 直接通信ワイヤレスネットワークのシミュレータ

図 2.12: チャネル数 n と運ばれた呼量

図 2.13: $a_{c,twohop}$ の $a_{c,pure}$ に対する比, ただし $\lambda = 7.2$.

図 2.14: $a_{c,twohop}$ の $a_{c,pure}$ に対する比．ただし $\lambda = 8.3$.

2.6 まとめ

この章ではセルラシステムにアドホックネットワーキングを適用した「直接通信ワイヤレスネットワーク」について検討し，直接通信ワイヤレスネットワークの性能を理論的に解析する方法を示した．この方法では，セルの大きさ，ノード間の直接通信範囲，セル内のトラヒック量，ノードの分布，呼の処理規則，トラヒックフローの挙動などを考慮にいれた理論的な解析の方法を示し，数値計算例を示した．この結果から直接通信ワイヤレスネットワークのいくつかの特性を得ることができた．ノードに直接通信を許すことによって，呼損率を1/3程度に低く抑えることができることが明らかになった．呼損率の振る舞いがチャネル数nの偶奇に依存していることが示された．また呼損率の振る舞いは，他のセルとの間で行われる通信トラヒックの流れに依存していることも示された．

この理論的方法を直接通信ネットワークの設計に適用することができる．またこの方法を，チャネル資源の効果的利用という観点から見て，アドホックネットワーキングが有効に働く範囲を見つけることに用いることができる．アドホックネットワーキングをセルラシステムに応用する前に，この「適用範囲」を慎重に検討するべきである．目標とする環境がこの「適用範囲」の外にあれば，アドホックネットワーキングを適用することはチャネル資源の有効利用という観点から見て，望ましくない．この章で述べた適用範囲を推定する方法は，このような目的にとって有用である．

アドホックネットワークを開発するに際して我々が克服するべき問題は多々ある．これらの問題には多くの理論的課題も含まれている．たとえば，この章では解析を容易にするためにセルの中のノードは移動しないと仮定した．しかしながら，移動はモバイルアドホックネットワークにおいて重要な要素である．[16]にお

いて，対象システムが一次元ではあるが，直接通信ワイヤレスネットワークにおける平均保留時間が理論的に解析されている．これらの問題を克服してアドホックネットワーキングの基礎的理論が確立されることが望まれる

参考文献

[1] V. H. Mac Donald, "The cellular concept," Bell System Technical Journal, Vol. 58, No. 1, pp. 15-41, July, 1978.

[2] L. Kleinrock and J. Silvester, "Spatial reuse in multihop packet radio networks" Proc. IEEE, vol. 75, no. 1, pp. 156-167, 1987.

[3] C. E. Perkins, Ad hoc Networking, Addison-Wesley, 2001.

[4] 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司, "アドホックネットワーク," 電子情報通信学会誌, vol. 84, no. 2, pp. 127-134 Feb. 2001

[5] G.J.Pottie and W.J.Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors" Communications of the ACM, Vol.43, No.5, pp.51-58, May 2000

[6] Yi-Bin Lin and I. Chlamtac, Wireless and Mobile Network Architectures, John Wiley & Sons, 2001.

[7] T. Adachi and M. Nakagawa, "A Study on Channel Usage in a Cellular·Ad-Hoc United Communication System for Operational Robots," IEICE Trans. Commun., vol. E81-B, no.7, pp.1500-1507, July 1998.

[8] T.Adachi and M.Nakagawa, "A Handoff Examination of a Hybrid System Using Cellular and Ad-hoc Modes" IEICE Trans. Commun., Vol.E83-B, No.11, pp.2494-2500, 2000

[9] 飯田登，深川周和，水野忠則，渡辺尚，"端末間直接通信を考慮した無線多重アクセスプロトコル" 電子情報通信学会論文誌 Vol.J82-B, No.7, pp.1347-1356, July 1999.

[10] D. E. Barton, F. N. David and E. Fix, "Random points in a circle and the analysis of chromosome pattern," Biometrica, vol. 50, no. 1, pp.23-29, 1963.

[11] 高木英明 "幾何学的確率の初等的モデル" 講義ノート，1999

[12] J.F.C. Kingman, Poisson Processes, Oxford Science Publications, 1993.

[13] L.A.Gimpelson "Analysis of mixture of wide and narrow band traffic" IEEE Transaction on Communication Technology, Vol.13, No.3, pp.258-266, 1965

[14] 秋丸春夫，R.B. クーパー 通信トラヒック工学 オーム社，1985

[15] 秋丸春夫，川島幸之助，"情報通信トラヒック-基礎と応用-"，電子通信協会，オーム社,1990

[16] 田中雄太，中野敬介，仙石正和，篠田庄司 "端末間直接通信と端末の移動の関係についての考察" 2001 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 講演予稿集 Vol.B-2，B-7-22，p.211，2001

第3章　アドホックリレーネットワークの通信トラヒック特性の解析

要約

セルラ方式では全ての通信が基地局を介して行われるが, 端末が建物の陰のなどのデッドスポットに入った場合基地局と通信することができなくなることがある. 本章では, このような場合に, 別の端末がデッドスポットに入った端末と基地局との間の通信を中継するアドホックリレー方式を検討し, その通信トラヒック特性を表す理論式を導く. この理論式の計算例から, 端末の通信能力が比較的小さな場合でも, アドホックな中継により呼損率が改善され, 運ばれる呼量も改善できることを示す. また, シミュレーションにより中継が二段だけで十分な場合があることを示す. これは上記理論式により多段中継の場合の通信トラヒック特性を推定できることを意味すると考えられる.

3.1　まえがき

セルラ方式 [1] においては, 基地局が構成するセルに属する端末が通信を行うときは, この基地局が必ず中継する. 異なるセルに存在する端末同士が相互に通信するときには, 基地局がバックボーンネットワークを介して相手端末のセルとの間で中継を行う. 同一セル内の端末が相互に通信を行うときもやはり, 基地局が端末

間の中継を行う．一方, アドホックネットワーキングという概念に基づいたネットワークに関する検討が行われている [2][3][4]．アドホックネットワークでは, 端末自身が中継や経路制御を行う能力をもち, 端末だけで動的にネットワークが構成される．ある端末が呼を発するときには, その端末が通信できる範囲内にいる端末が中継局としての役割を果たし, 多段の中継により相手端末との間の通信経路が作り出される．

アドホックネットワークは，セルラ通信の基地局が整備されていない地域での通信や，災害等で基地局やバックボーンネットワークなどが機能しないときのネットワークとして期待されている．また，多くのセンサーが配備され，それらが自律的に相互に通信し合ってネットワークを形成するセンサーネットワーク [5][6] などが議論されている．

アドホックネットワークはそれ自体でネットワークとなりうるが, その他の応用として, セルラ方式にアドホックネットワーキングを適用するという考え方がある．第２章で述べた，同一セル内の端末同士が基地局を介さずに直接通信することにより，基地局に負担をかけず，また回線資源を有効に利用する直接通信ネットワークはその例である．

セルラ方式の問題点の一つとして, セル内に存在する端末が障害物等の影響により基地局と通信できないということがある．このような場所をデッドスポットと呼び, この問題をデッドスポット問題と呼ぶことにする．デッドスポットに存在する端末と基地局の間の通信経路をアドホックネットワークにより形成し, デッドスポット問題を解消しようとする試みがある [7]．例えば, 図１における端末 A のように, デッドスポットに在るときに, 端末 B に中継してもらうことによって, 端末 A は基地局と通信することができる．

図 3.1: 中継による基地局との接続

このアイデアはセルラ方式にアドホックな通信の一形態を持ち込んだものである．本章では, このような系を「アドホックリレー系」と呼ぶことにする．アドホックリレー系を検討するにあたっては, さまざまな問題, たとえば中継端末を見つけて通信を成立させる方法, 端末の移動によっても中継が中断されないようにする方法などの議論が必要である．Aggelou[7] は, これらの問題を解決する 1 つの方式の提案を行っている．また, アドホックリレー系が実現した場合にもたらされる効果について, [7] は, シミュレーションを行って, 系全体のスループットの改善がもたらされることを示した．これに対して, 本章では, まず, 二段 (two-hop) だけの中継によって, どの程度の通信トラヒックの改善が見込めるのかを, 明らかにするための理論解析手法について検討する．この方法を用いて端末間直接通信の通信距離, デッドスポットの存在確率などのパラメータを考慮して解析を行う．次に, 二段に限らず三段以上の多段中継を行うことの効果をシミュレーションによって明らかにし, 端末がデッドスポットに存在する確率が小さければ, 二段中継を行うだけでだけで十分な性能が得られることを示す．これは, 上記解析手法により, 多段中継の場合の通信トラヒック特性の推定を行えることを意味する．

第 2 章で述べた直接通信ネットワークで用いた理論的計算方法，すなわち幾何

学的確率と多元ネットワークモデルを用いて系のトラヒック特性を解析するという手法を，本章のデッドスポット問題にも適用する．

3.2 モデル

デッドスポットに関しては次のように考える．端末が基地局との直接通信を良好に行えない場所を, 対基地局デッドスポットと呼ぶ．建物や樹木などの障害物がランダムに存在すると考え, 対基地局デッドスポットもランダムに存在するものと仮定する．また, 基地局からの電波は距離の累乗に比例して弱くなると考えられるから（参考文献）, 対基地局デッドスポットは基地局から遠い場所で多くなると仮定する．基地局と端末との間の通信に関してデッドスポットがあるのと同様に, 端末同士が通信しようとするときにも, その間に障害物があれば通信に障害が起こることがある．端末同士がこのような関係にあるとき, やはり端末がデッドスポットにあるという．このようなデッドスポットを対端末デッドスポットと呼ぶことにする．

セルとそこで発生する呼については次のように考える．基地局がカバーする範囲を, 半径 r_1 の円とし, この中に密度 λ_s で端末がランダムに分布しているものとする．ある領域に存在する端末の数はポアソン分布に従うものとする．セルの面積は $\pi {r_1}^2$ であるからセル内に存在する端末数の平均は $\lambda_s \pi {r_1}^2$ である．ここではセル内の端末数が十分に大きい場合を考える．セル内で生起する呼は, 到着率 λ_c のポアソン分布に従って到着するものとする．呼の保留時間は平均 $1/\mu$ の指数分布に従うものとする．またひとつのセルには n 個の回線が割当てられていることとする．呼が発生したとき，必要な数の回線が確保できれば接続され，そうでなければ接続を断念する完全線群，即時式のシステムとする．

以下にデッドスポットと回線の割当てに関する仮定を示す．

まず，対基地局デッドスポットに関して，次のように仮定する．セル内に存在するある端末 A を考えて, この端末と基地局の間の距離をランダム変数 Y で表す．

本章では１つのセルの中だけでの議論を行うので, r_1 の円の外側では $\lambda_s = 0$ であり, $0 \leq Y \leq r_1$ である．前述のように, 基地局からの距離によって端末が対基地局デッドスポットに在る確率が異なるものとしているので, セルを基地局からの距離によって２つの領域に分け，それぞれの領域でデッドスポットの存在確率が異なるものとする．すなわち，$r_2 < Y \leq r_1$ であるとき, この端末は, 確率 p_1 で基地局と直接通信することができ, 確率 $1 - p_1$ で対基地局デッドスポットに存在していて, 基地局と直接通信できないものと仮定する．また, $0 \leq Y \leq r_2$ であるとき, この端末は, 確率 p_2 で基地局と直接通信することができ, 確率 $1 - p_2$ で対基地局デッドスポットに存在していて, 基地局と直接通信できないものと仮定する（図 3.2 参照）．基地局と直接通信を行うとき, 端末はセルの回線を１つ使用するものとする．

次に，対端末デッドスポットに関して次のように仮定する．アドホックリレー系では, 端末同士は互いの距離が d 以下であるとき, 直接に通信が可能であるものとする．ただし, 互いの距離が d 以下であっても, 対端末デッドスポットに在ることがあり得るから, 互いに直接通信できる確率を p_d とする．対端末デッドスポットに在る確率は $1 - p_d$ で, この確率で直接通信ができないものとする．なお, d の大きさには特に制限を設けないが, 通常, 基地局の送信能力, 受信能力は端末のそれよりも大きいと考えられるので, 基地局-端末間の通信可能距離 r_1 は, 端末-端末間の通信距離 d よりも大きいと仮定する．

端末の中継能力と中継のために用いる回線について，次のように考える．すべての端末は中継機能を有すると仮定する．通常のセルラ方式では, 端末が対基地局デッドスポットに存在する場合には呼損となるが, これに対してアドホックリレー系では端末 A が対基地局デッドスポットに存在するとき, 端末 A から距離 d 以内に A 以外の端末 B が存在して, 端末 A と端末 B が対端末デッドスポットに無く, か

図 3.2: デッドスポットのモデル

つ, 端末 B が基地局と直接通信可能であれば, 端末 A は端末 B の中継により基地局と通信できるものとする．ただし, この場合には, 系の回線資源を端末 A と端末 B との間で 1 回線, 端末 B と基地局との間で 1 回線あわせて 2 回線分使用するものとする．中継端末 B は無限の能力を持つものと仮定する．すなわち，自分自身が通話しているときでも，同時に，並行して他の端末のための中継動作を行うことができる．また，任意の個数の中継を同時並行に行うことができるものとする．

このような, 中継端末が一つだけ介在するような中継を, 二段 (two-hop) 中継と呼ぶ. 一般には複数の端末が連鎖的に繰り返し中継を行う方式もありえる. 本章では, 二段中継を行うシステムを理論的に解析する. 三段以上の中継（多段中継と呼ぶ）についてはシミュレーションによる検討を行う.

なお，中継端末の選択方法は，中継距離や消費電力などさまざまな指標による最適選択方法がありえるが，本章では，その方法は問題とせず，セルの回線資源の競合だけを議論する．以上述べたようなモデルによるアドホックリレー系の実現の方法については, 中継端末の選択方法も含めて第 3.6 節で述べる.

3.3 解析

3.3.1 通常のセルラ方式の呼損率

本節では, 端末が対基地局デッドスポットには存在せず, 基地局と直接通信できる呼の到着率を求める. この到着率を用いると, アドホックな中継が行われない通常のセルラ方式の呼損率をデッドスポットの影響を考慮して計算することができる.

セル内に存在する端末から呼が生起した場合を考える. この端末から基地局への距離をランダム変数 Y で表す. 次の二つの事象を考える.

事象 A $0 \leq Y \leq r_2$

事象 B この端末は対基地局デッドスポットには存在しない.

このとき,

$$P(B|A) = p_2 \tag{3.1}$$

$$P(B|\overline{A}) = p_1 \tag{3.2}$$

である.

基地局と直接通信できる端末で発生する呼の到着率 λ_1 を求める. ポアソン分布についての Coloring 定理 [9] により,

$$\lambda_1 = \lambda_c P(B) \tag{3.3}$$

であり, 到着過程はポアソン分布となる. この端末はセル内に一様に分布していると考えることができるので,

$$P(B) \quad = \quad P(B|A)P(A) + P(B|\overline{A}) \cdot P(\overline{A})$$

$$= \quad p_2 \frac{\pi {r_2}^2}{\pi {r_1}^2} + p_1 \left(1 - \frac{\pi {r_2}^2}{\pi {r_1}^2}\right) \tag{3.4}$$

よって, 系にに加わる呼の到着率 は,

$$\lambda_1 = \lambda_c \left\{ p_2 \frac{\pi {r_2}^2}{\pi {r_1}^2} + p_1 \left(1 - \frac{\pi {r_2}^2}{\pi {r_1}^2}\right) \right\} \tag{3.5}$$

となる.

これらの呼は 1 回線を使用するので, その呼損率は Erlang-B 式を用いて,

$$E_n(a_1) = \frac{\frac{{a_1}^n}{n!}}{\sum_{i=0}^{n} \frac{{a_1}^i}{i!}} \tag{3.6}$$

で与えられる. ここで $a_1 = \lambda_1/\mu$ である. ただし, 対基地局デッドスポットに存在することによって失われる呼量 a_{ds} があって,

$$\lambda_{ds} = \lambda_c P(\overline{B}) = \lambda_c (1 - P(B)) \tag{3.7}$$

とすると $a_{ds} = \lambda_{ds}/\mu$ である. これを用いて, この場合の呼損率 B_c を,

$$B_c = \frac{a_1 E_n(a_1) + a_{ds}}{a_1 + a_{ds}} \tag{3.8}$$

と定義する. B_c はアドホックな中継が行われない, 通常のセルラ系の呼損率であり, アドホックリレー系の呼損率の上限を与える.

3.3.2 アドホックリレー系の呼損率

二段中継までの中継に制限したアドホックリレー系の呼損率を計算する方法を示す. まず中継が行われる呼の到着率 λ_2 を与える計算式を示し, 次に系の呼損率を与える式を示す.

アドホックリレー系では, 前節で求めた1回線を要求する呼が到着率 λ_1 で加わる．それに加えて, 端末の中継によって2回線を必要とする呼が発生する．以下, 2回線を要求する呼の到着率 λ_2 を検討する．1つのセルの中に存在する端末に関して, 前記の事象 A,B の他に次の事象 C を考える．

事象 C 今考えている端末に対して, 基地局との通信を中継できる端末が存在する．

各端末は独立に対基地局デッドスポットに入るとして, 事象 A の条件下で事象 $\overline{B}$ と事象 C は独立であると仮定する．また事象 $\overline{A}$ の条件下でも事象 $\overline{B}$ と事象 C は独立であると仮定する．2回線を要求する呼が生起するのは, 事象 $\overline{B} \cap C$ が起こったときである．2回線を要求する呼の到着率 λ_2 は

$$\lambda_2 = \lambda_c \cdot P(\overline{B} \cap C) \tag{3.9}$$

と表される．以下 λ_2 を計算する式を求める．

$$\begin{aligned}
&P(\overline{B} \cap C) \\
&= P(\overline{B} \cap C|A) \cdot P(A) + P(\overline{B} \cap C|\overline{A})P(\overline{A}) \\
&= P(\overline{B}|A)P(C|A)P(A) + P(\overline{B}|\overline{A})P(C|\overline{A})P(\overline{A}) \\
&= (1-p_2)P(C|A)\frac{\pi {r_2}^2}{\pi {r_1}^2} + (1-p_1)P(C|\overline{A})\frac{\pi {r_1}^2 - \pi {r_2}^2}{\pi {r_1}^2} \qquad (3.10)
\end{aligned}$$

である．式 (3.10) の2行目から3行目への展開で，条件付独立な事象についての性質を用いた．すなわち，確率事象 X,Y が条件 Z の下で独立であれば,

$$P(X \cap Y|Z) = P(X|Z) \cap (Y|Z) \tag{3.11}$$

が成り立つ [8].

次に $P(C|\overline{A})$ と $P(C|A)$ を求める．端末と基地局との間の距離をあらわすランダム変数 Y の確率密度関数 $f(y)$ は, $f(y) = \dfrac{2\pi y}{\pi {r_1}^2}$ である．距離 Y が $r_2 < Y \leq r_1$ という条件つきでの確率密度関数は

$$f(y|r_2{<}Y{\leq}r_1) = \frac{\dfrac{2\pi y}{\pi {r_1}^2}}{\dfrac{\pi {r_1}^2 - \pi {r_2}^2}{\pi {r_1}^2}} = \frac{2y}{{r_1}^2 - {r_2}^2} \tag{3.12}$$

と表すことができる．基地局を中心とした半径 y の円と半径 $y + dy$ のとで作られる円環に存在している端末が, 自分の通信範囲（半径 d の円）の中に中継端末 B を見つけ出すことができる確率を $q(y)$ とすると,

$$P(C|\overline{A}) = \int_{r_2}^{r_1} q(y) f(y|r_2{<}Y{\leq}r_1) dy \tag{3.13}$$

である．

同様にして,

$$f(y|0{<}Y{\leq}r_2) = \frac{\dfrac{2\pi y}{\pi {r_1}^2}}{\dfrac{\pi {r_2}^2}{\pi {r_1}^2}} = \frac{2y}{{r_2}^2} \tag{3.14}$$

として,

$$P(C|A) = \int_0^{r_2} q(y) f(y|0{<}Y{\leq}r_2) dy \tag{3.15}$$

である．

次に $q(y)$ を導く．

基地局からの距離が y の地点に在る端末 A を考える．$q(y)$ は，端末 A が自分の通信半径 d の領域の中に中継端末を見つけ出すことができる確率である．

図 3.2 で端末 A を中心とする半径 d の円と, 基地局を中心とする半径 r_1 の円および半径 r_2 の円がつくる円環とが交わる領域を領域 1 とし, その面積を S_1 とする．同様に, 端末 A を中心とする半径 d の円と, 基地局を中心とする半径 r_2 の円とが交

わる領域を領域２とし，その面積を S_2 とする．$q(y)$ は，端末 A が領域１または領域２の中に，対端末デッドスポットになく，かつ基地局と直接通信することが可能な中継端末を一つ以上見つけ出すことができる確率である．領域１の中に中継端末が一つも存在しない確率を $p(A1)$, 領域２の中に中継端末が一つも存在しない確率を $p(A2)$ と書くと，領域１または領域２に中継端末が一つ以上ある確率 $q(y)$ は，

$$q(y) = 1 - p(A1)p(A2)$$

で与えられる．

端末の存在密度 λ_s で与えられるとき，面積 S の中にひとつも端末が存在しない確率は，

$$exp(-\lambda_s S)$$

と表すことができる．

領域１に存在する端末は基地局と確率 p_1 で通信することが可能であり，確率 p_d で端末 A と通信することができる．したがって，Coloring 定理を用いて，中継端末になりえる端末は平均 $p_d p_1 \lambda_s$ の密度で領域１の中に存在していることになるから，

$$p(A1) = exp(-p_d p_1 \lambda_s S_1)$$

と表すことができる．同様にして

$$p(A2) = exp(-p_d p_2 \lambda_s S_2)$$

であるから，一個以上の中継端末が存在する確率 $q(y)$ は

$$q(y) = 1 - exp(-p_d p_1 \lambda_s S_1) exp(-p_d p_2 \lambda_s S_2) \tag{3.16}$$

と表される．

面積 S_1 と S_2 は, r_1, r_2, d, y から計算することができる．半径 a の円と半径 b の円とがあってその中心間の距離が c であるとき，二つの円の交わりの部分の面積を $IS(a,b,c)$ と書くと，面積 S_1 と S_2 は

$$S_1 = IS(r_1, d, y) - S_2$$

$$S_2 = IS(d, r_2, y)$$

で与えられる．

式 (3.16) をみると, $q(y)$ を定める本質的なパラメータは, p_1, p_2, $p_d \cdot \lambda_s$ の３つである．今後の議論ではセルの面積を S_{cell} として, 中継端末の見つけやすさの指標として $rr = p_d \cdot \lambda_s \cdot S_{cell}$ を導入して議論する．rr は，対端末デッドスポットには存在しない，中継動作が可能な端末の平均数に相当する指標である．

以上の結果を用いて, 式 (3.9)-式 (3.16) より，２回線を要求する呼の到着率 λ_2 を計算することができる．

これらを総合すると, 全体の呼のうち, 到着率 λ_1(式 (3.5)) の呼が 1 回線を要求し, 到着率 λ_2 の呼が 2 回線を要求し, 系の回線資源を奪い合う．また, 確率 $P(\overline{B} \cap \overline{C})$ で呼は, はじめから呼損となる．第３の呼の到着率は $\lambda_3 = \lambda_c - \lambda_1 - \lambda_2$ と書ける．Coloring 定理により, これらの呼はそれぞれポアソン到着となっている．

以下, 系の呼損率を与える計算式を検討する．多元トラヒック理論 [10] を適用すれば, 1 回線を用いる呼, 2 回線を用いる呼のそれぞれに対する呼損率 B_1', B_2' を求めることができる．

$$B_1' = \sum_{j=0}^{s} P_{n-2j,j} = P_{0,0} \sum_{j=0}^{s} \frac{\alpha^{n-2j}}{(n-2j)!} \frac{\beta^j}{j!} \tag{3.17}$$

$$B_2' = \sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=n-2(j+1)+1}^{n-2j} P_{i,j} + \sum_{i=0}^{k} P_{i,s}$$

$$= \left(\sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=n-2(j+1)+1}^{n-2j} \frac{\alpha^i}{i!} \frac{\beta^j}{j!} + \frac{\beta^s}{s!} \sum_{i=0}^{k} \frac{\alpha^i}{i!} \right) \cdot P_{0,0} \tag{3.18}$$

ここで $P_{i,j}$ は平衡状態において，1回線を用いる呼が i 個，2回線を用いる呼が j 個存在する確率で，

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{\mu}$$

$$\beta = \frac{\lambda_2}{\mu}$$

として，

$$P_{0,0} = \frac{1}{\sum_{j=0}^{s} \sum_{i=0}^{n-2j} \frac{\alpha^i}{i!} \frac{\beta^j}{j!}}$$

$$P_{i,j} = \frac{\alpha^i}{i!} \frac{\beta^j}{j!} P_{0,0}$$

である．ただし，$k = n \bmod 2$, $s = [n/2]$ で，$[t]$ は t を越えない最大の整数をあらわす．なお，この呼損率の式は，あくまで，1回線を要求した呼と2回線要求した呼とを全体と見たときの呼損率である．系に加わる呼にはこのほかに，直接基地局と通信できず，かつ，中継端末が見つからない呼が到着率 λ_3 で存在し，その全てが呼損となる．これらを表現するために，ここでは，以下のような割合 B_1, B_2, B_3 を考える．

$$B_1 = \frac{\lambda_1/\mu}{\lambda_1/\mu + \lambda_2/\mu + \lambda_3/\mu} B_1' \tag{3.19}$$

は，系で発生する呼量に対する，1回線を確保できないために失われる呼量の割合である．同様に

$$B_2 = \frac{\lambda_2/\mu}{\lambda_1/\mu + \lambda_2/\mu + \lambda_3/\mu} B_2' \tag{3.20}$$

は，2回線を確保できないために失われる呼量の割合であり，

$$B_3 = \frac{\lambda_3/\mu}{\lambda_1/\mu + \lambda_2/\mu + \lambda_3/\mu} \tag{3.21}$$

は，中継端末を確保できないために失われる呼量の割合である．これらの割合を用いると系全体での呼損率は

$$B = B_1 + B_2 + B_3 \tag{3.22}$$

で与えられる．

ここで用いた，多元トラヒック理論 [10] は，入線数が無限であることを仮定している．いま検討しているアドホックリレーネットワークでは，セル内に存在する端末の数は有限であるから，無条件に多元トラヒック理論を適用することはできない．しかし，入線数が無限であるとの仮定は，システムに課せられる負荷を大きめに見積もった安全側の近似であり，大きめの呼損率を与える．また，出線数に対して入線数が大きいときには，この近似の程度は非常によい [10]．次節でのべる計算例では，出線数 20 に対して入線数（端末数）は 100 としている．

また，$q(y)$(式 (3.16)) の導出に当たっては，対端末デッドスポットにも，対基地局デッドスポットにも存在しない端末は，中継端末になりえるものと仮定した．これは，端末が，自分が通信中であっても，また，他の呼を中継中であっても，新たな中継を引き受けることができる，と仮定したことに相当する．この仮定は，最大でセルの回線数の 1/2 に等しい数だけ多重に中継が可能な端末を仮定していることになる．

3.4 計算例と議論

3.4.1 呼損率

式(3.8)および式(3.19)-(3.22)を用いると，セルラ方式での呼損率とアドホックリレー系の呼損率とを計算することができる．本節では計算結果，シミュレーション結果を参照しながら議論を行う．以下の説明の中では3つの指標p_1,p_2,rrをまとめて通信可能指標P_cと呼び，3つ組(p_1, p_2, rr)で表記する．

図3.3は$r_1 = 200$, $r_2 = 100$, $\lambda_c = 8.2$, $1/\mu = 1.5$, $n = 20$, $P_c = (0.8, 0.9, 80)$の場合について呼損率を計算した例である．横軸は端末の通信距離d，縦軸は呼損率，あるいは失われた呼量の系全体の呼量に対する割合である．この例では，$p_1 = 0.8, p_2 = 0.9$であるからすべての端末のうち約18%の端末が対基地局デッドスポットに在ると仮定していることになる．B_Cは式(3.8)による呼損率，すなわち，端末に中継能力を持たせない，通常のセルラ方式の呼損率である．この計算例では，B_cは約18%である．B_1, B_2, B_3はそれぞれ，式(3.19),(3.20),(3.21)の計算値であり，$B = B_1 + B_2 + B_3$である．また比較のためにB_eとして，全くデッドスポットが存在しないときの系の呼損率を示した．なお図3.3には，同一モデル，同一条件でのシミュレーション結果も併せてプロットした．

端末の通信範囲dが30以下では，B_3すなわち対基地局デッドスポットにいる端末が，中継をしてくれる端末を見つけられないことによって失われた呼の呼量が支配的である．dが60以上の範囲では，B_3は0.002以下になって無視できるほど小さい．これは，セルの半径200に対して端末の通信半径60と1/3程度以上になると，ほとんどの場合中継端末が見つかることを意味している．この範囲では，呼損率を支配するのは回線資源の競合によるB_1, B_2である．この範囲では呼損率Bはグラフから読み取ると5%程度である．この値は中継機能を持たない通常のセル

図 3.3: $P_c = (0.8, 0.9, 80)$ の場合の呼損率の計算例．線は理論値, ▲△○●はシミュレーションの結果を表す.

ラ方式の呼損率 B_c が約 18% であることと比べると十分に小さく，端末による中継がトラヒックの改善に大きく寄与することがわかる．

図 3.3 にプロットされたシミュレーションの結果をみると，理論式による計算と非常によく一致している．これは，前節で述べた理論式の導出が正しかったことの傍証である．シミュレーション結果の B_1 は，呼を発した端末が対基地局デッドスポットに存在せず，かつ，1 回線を確保して，基地局と通信できた呼の個数を，全発呼数で除したものである．また，シミュレーション結果の B_2 は，呼を発した端末が対基地局デッドスポットに在って，かつ中継端末を発見することができ，かつ 2 回線を確保して基地局と通信できた呼の個数を，全発呼数で除したものである．また B_3 は呼を発した端末が対基地局デッドスポットに在って，中継端末を発見できなかった呼の数と，中継端末を発見できたものの，2 回線を確保することができなかった呼の数の合計を，全発呼数で除したものである．

図 3.4: アドホックリレーネットワークのシミュレータ

図3.4に，シミュレータの画面の例を示す．セルの大きさ，呼の到着率，デッドスポットの存在確率などを設定して，シミュレーションすることができる．また，本シミュレータを用いて，中継端末が選択される様子を視覚的に表示することができる．

本シミュレータの目的は，第3.3節に示した理論的解析手法の正しさを確認することである．その意味で，このシミュレータでは第3.2節で示したモデルとその仮定を忠実に再現している．

呼が発生するたびに，Poisson分布に従う個数の端末を生成させ，その位置をランダムに与えた上で，対基地局基地局デッドスポットに入っているか否かを決定し，対基地局基地局デッドスポットに在る場合には，中継が可能であるか否かを調べている.. また本シミュレータでは，中継端末が複数存在するとき，いづれかの端末を優先的に選択する規則は，なにも持っていない．最小中継段数で最初に見つかった端末を中継端末としている．

端末の配置と中継端末の存在のテストは次のように行っている．

1. 発呼する端末 tm を生成し，その位置を定める．この端末が対基地局デッドスポットに入っていなければ，1回線を要求する呼を生成する．
2. Poisson分布に従って，存在している端末の数 n を決め，発呼端末を除いた $n-1$ の端末の位置をランダムに定める．
3. 端末 tm に対して，中継端末になりえる端末を $n-1$ 個の端末の中から探す．この順序は上のステップで生成された順に行う．基地局との間で中継を行える端末がみつかれば，最初に見つかった端末を用いる．
4. 上のステップで端末が見つからなければ，n 個の中継端末候補を基点として再帰的に中継端末を探索する．

図3.5に $P_c = (0.7, 0.9, 70)$ の場合と，図3.6に $P_c = (0.9, 1.0, 90)$ の場合の計算結果を示す．その他の条件は図3.3の場合と同じである． 直接通信可能な確率

p_1, p_2, p_d の値が小さくなると，デッドスポットにいる確率は大きくなるから，呼損率は増加する．図 3.5 の $P_c = (0.7, 0.9, 70)$ の場合，$d > 75$ の領域で B_3 がほぼゼロになり，呼損率 B は約 7.1% で一定の値に落ち着く．デッドスポットにいる確率が高くなるような環境では，端末の通信範囲 d も大きいことが要求される．

図 3.6 の $P_c = (0.9, 1.0, 90)$ のとき，すなわちデッドスポットにいる確率が小さい場合には，$d > 50$ で呼損率 B は約 2.6% で一定となり，逆のことが言える．

なお，この 3 つの計算例では，平均端末数 $\lambda_s \pi {r_1}^2 = 100$ としているので，呼の到着率 λ_c と端末の空間的な密度 λ_s との比例関係を表す比例定数 k は，$k = 8.2\pi {r_1}^2/100$ である．

図 3.7，図 3.8，図 3.9 に p_d が小さく，中継が可能な端末の密度が小さいときの呼損率の計算例を示す．この 3 つの図はそれぞれ図 3.3，図 3.5，図 3.6 に対応する．前の図がセルに存在する平均端末数が 100 で，中継可能端末の数が 70 ないし 90 台であったのに対し，中継可能端末数が半数の 35 ないし 45 台である場合の計算例である．対応する図を互いに比べると，中継可能端末の密度が小さいときには中継端末が見つからないことによる呼損 B_3 が，なかなか低下しないことがわかる．

図 3.10，図 3.11 に，シミュレータの画面を用いて，二段中継が起こる様子を示す．図 3.10 は，半径 200 のセルの中に平均 50 個の端末がランダムに存在して，$P_c = (0.5, 0.5, 50)$ であるときの一例である．M は呼を発した端末でデッドスポットに在るとする．B は基地局である．小さい点はデッドスポットに在る端末，大きい点は基地局と直接通信できる端末を示す．ここで端末 M は，デッドスポットに在るために基地局と直接通信することができないが，通信半径 30 以内の場所に端末 Mr が存在して，図 3.11 のように，Mr が，M と基地局 B との間の中継を行う．

図 3.5: $P_c = (0.7, 0.9, 70)$ の場合の呼損率の計算例．その他の条件は図 3.3 の場合と同じ

図 3.6: $P_c = (0.9, 1.0, 90)$ の場合の呼損率の計算例．その他の条件は図 3.3 の場合と同じ

図 3.7: 中継可能端末密度が小さいときの呼損率 (1) P_c: (0.8, 0.9, 40)). その他の条件は図 3.3 の場合と同じ

図 3.8: 中継可能端末密度が小さいときの呼損率 (2)] $P_c : (0.7, 0.9, 35)$). その他の条件は図 3.3 の場合と同じ

図 3.9: 中継可能端末密度が小さいときの呼損率 (3) P_c : $(0.9, 1.0, 45)$). その他の条件は図 3.3 の場合と同じ

図 3.10: 二段中継．端末 M はデッドスポットに在って，基地局 B と通信ができない．

図 3.11: 二段中継．端末 Mr が M のための中継を行って，基地局 B との通信を実現する．

3.4.2 運ばれた呼量

この系で運ばれた呼量を次の式で定義する.

$$a_c = a_1(1 - B_1') + a_2(1 - B_2') \tag{3.23}$$

ただし, $a_i = \lambda_i/\mu$ $(i = 1, 2)$ である. この運ばれた呼量を 3 種類の P_c について図 3.12 に示す. アドホックリレー方式の導入により, 基地局通信半径 200 に対して, 端末の通信範囲 d が 10 から 40 程度と比較的小さな範囲で, 運ばれた呼量 a_c が増加して, 急激に改善することがわかる.

端末がデッドスポットに在る確率が小さい $P_c = (0.9, 1.0, 90)$ の時には, もともと運ばれた呼量が大きい. 端末の通信範囲が 0, すなわち, 中継が行われない場合でも $11Erl$ の呼量が運ばれている. 端末の通信距離が 50 あれば, 運ばれた呼量は $12Erl$ 弱となって飽和に達する.

端末がデッドスポットに在る確率が比較的大きな $P_c = (0.7, 0.9, 70)$ の時には, 中継による改善度合いが大きい. 端末の通信距離が 80 あれば, 運ばれた呼量は 20%以上改善する.

図 3.12: さまざまな P_c に対する運ばれた呼量. 計算の条件は図 3.3 の場合と同じ.

3.5 多段中継

前章までに, アドホックリレー方式を適用してデッドスポット問題を回避する方法の効果について, 理論的に取り扱う方法を示し, 二段の中継により呼損率を大きく改善できることを示した. アドホック通信の考え方によれば, 二段中継にとどまらず, 三段以上の多段中継を行うことにができる [2][7]. 本章では, デッドスポット問題に多段中継を適用することの効果を, シミュレーション結果を用いて議論する.

図 3.13-3.15 に三段ホップが行われる様子を示す. 端末 M はデッドスポットに在って基地局 B と直接通信することができない. 端末 M から半径 30 以内の場所に在る端末 $Mr1$ が中継しようとするが, $Mr1$ も基地局 B と直接通信することができない (図 3.14). さらに端末 $Mr1$ から距離 30 以内に在る端末 $Mr2$ が中継してはじめて, 端末 M は基地局 B と直接通信することができる (図 3.15).

図 3.16 に, 多段中継のシミュレーション結果を示す. 図で, 線で示したプロットは, 二段中継を行った場合の理論値である. 点プロットが多段中継のシミュレーション結果である. シミュレーションに用いたモデルは第 3.3 節で示したモデルに, 複数の中継端末を経由して基地局と接続することを付け加えたものである. h 個の端末を経由した $h+1$ ホップの通信は, $h+1$ 個の回線を確保できてはじめて呼が成立するものとした. 二段中継の理論値と多段中継のシミュレーション結果との間に大きな差は無い. $20 < d < 40$ の範囲を調べると, 多段中継の B_1, B_2 がわずかに増加し, B_3 がわずかに減少する. しかし, 呼損率 $B = B_1 + B_2 + B_3$ にはほとんど影響を与えない.

図 3.17 は, $P_c = (0.6, 0.7, 50)$, すなわち対基地局デッドスポットに在る確率が非常に大きく, 約 40% の端末は対基地局デッドスポットにあるとして, かつ, 対端末デッドスポットに無い中継可能な端末数も 50 程度しかセルの中に存在しないと

図 3.13: 三段中継 (1) 端末 M はデッドスポットに在って基地局 B と直接通信することができない

図 3.14: 三段中継 (2) 端末 $Mr1$ が中継しようとするが，$Mr1$ も基地局 B と直接通信することができない.

図 3.15: 三段中継 (3) さらに端末 $Mr2$ が中継してはじめて基地局 B と直接通信することができる.

きのシミュレーション結果である．実線はやはり同一条件で，二段中継までを許したときの理論値である．

この図 3.17 では, $20 \leq d \leq 70$ の広い範囲で, 中継端末が見つからないことが原因となって失われた呼の呼量の割合 (B_3) が数%減少していることが読み取れる．しかしその一方で, 同じ範囲で, 中継端末が見つかったものの回線を確保できないことによる失われた呼量の割合 (B_2) が増加し. また, 基地局と直接通信する呼の失われた呼量の割合 (B_1) も増加している．このため呼損率 B は, 二段中継の理論値とほぼ同じ値となっている．なお, 図 3.16 および図 3.17 においてシミュレーション結果の B_2 は, 多段の中継をしようとして中継端末は見つかったものの, 必要な数の回線を確保できずに失われた呼の呼量の割合である．

これらの図で示した結果では, 多段中継による呼損率の改善はほとんど期待できない, と考えることができる. 以下, その理由について若干の考察を加える.

図 3.18 は, 図 3.16 のシミュレーションを行ったときに, h ホップによって初めて基地局と通信することができた呼の数を計数して, プロットしたものである．たとえば, 3-hop のプロットは, 直接通信では基地局と通信することができず, 二段中継 (two-hop) でも基地局と通信することができず, 三段中継 (3-hop) で初めて基地局と通信することができた呼の数をプロットしてある. グラフにはシミュレーションを 10 回行ったときの呼数の平均を対数でプロットした.

$d = 35$ の場合, 約 2 万個の呼が直接基地局に対して行われ, 二段中継が行われた呼の数は約 3500 個である．これに対して, 三段中継が行われた呼の数は約 150 にしか過ぎず, 四段中継が行われた呼の数は 20 しかない．このように, 中継段数を増やすことによって基地局との通信が可能になる呼の数は指数関数的に減少している. $P_c = (0.8, 0.9, 80)$ という条件の下では, 対基地局デッドスポットに在る端末が

図 3.16: 多段中継の効果のシミュレーション. $P_c = (0.8, 0.9, 80)$, その他の条件は図 3.3 の場合と同じ. ただし実線は二段中継を行うときの理論値

図 3.17: 多段中継の効果のシミュレーション. $P_c = (0.6, 0.7, 50)$, その他の条件は図 3.3 の場合と同じ. ただし実線は二段中継を行うときの理論値

図 3.18: 多段中継の生起数. $P_c = (0.8, 0.9, 80)$ の場合.

発した呼に対して, ほとんどの場合二段中継までで基地局との間の通信が確保されている.

図 3.19 は, $P_c = (0.6, 0.7, 50)$ 場合の各段数での中継が行われた個数をプロットしたものである. 図 3.18 と比較すると, 二段中継によって通信が行われた呼の数が少なく, それに比べて, 三段中継, 四段中継によって通信が実現した個数が増加している. これは $P_c = (0.6, 0.7, 50)$ であって, 呼を発した端末も, 中継端末の候補となった端末も, 直接基地局と通信できる確率が低く, さらに中継端末を探すためである. 多段中継は, 端末が対基地局デッドスポットに在る確率が高いときに, 中継端末をよりよく見つけ出すという効果をもたらすと言える. しかしながら図 3.17 に示されているように, 多段中継の増加は, 回線が確保できないことによる呼損の増加をもたらすことになり, 結果的に呼損率の改善は行われていない.

図 3.18, 図 3.19 の双方共に, d が小さいときに多段中継が行われる呼の数が減少している. これは, 端末の通信範囲が小さいときには, 通信円の面積が小さく, その中に存在する中継端末の候補となる端末が少なくなるからであると考えられる. また, d が大きいときにも多段中継の頻度は減少する. これは端末の通信半径が大きく, 多くの端末が通信円の中に存在し, 少数段だけで中継が成立する頻度が大きくなるからであると考えられる.

図 3.19: 多段中継の生起数. $P_c = (0.6, 0.7, 50)$ の場合

3.6 アドホックリレーネットワークの実現と関連研究

前節までにアドホックリレーによるデッドスポット問題の解決について，回線資源の有効性の観点からシステムのトラヒック特性を解析する理論的手法を示した．このような手法が有効であるためには，アドホックリレーが実際に実現可能であることが必要である．この節では，すでに行われているアドホックネットワークの実現方法に関する研究・考察を紹介する．特に中継端末を実現する方法と中継端末を発見する方法および中継ルートを決定する方法が重要であり，いくつかの方式を取り上げて説明する．

3.6.1 中継端末の実現方法

Aggelou の提案

Aggelou[7] は，アドホックリレーネットワークで用いる端末として，GSM ハンドセットとしてのモジュールとアドホック GSM(A-GSM) ハンドセットとしてのモジュールの両方を備えたデュアルモード端末を提案している．GSM モジュールは通常の GSM インターフェースにしたがって基地局との間で通信を行う能力を有している．A-GSM モジュールはモバイルアドホックネットワーク (MANET) としての通信能力を有している．一方のモジュール（たとえば GSM モジュール）が通信を行っている間も，他方（A-GSM）は，MANET の情報を監視している．

二つのモジュールの間は，DIMIWU と称するネットワーク間接続モジュールでつながれ，両プロトコル間の変換を行い，物理レベルの信号変換も行う．

Aggelou の方法では，中継端末が複数の中継容量を持つことを仮定している．すなわちある中継端末は同時に複数の通信を中継することができる．

DECT

DECT(Digital Enhanced Codeless Telecommunication, 例えば[11], pp.641-738)は建造物内における通信を主用途とした無線通信方式であり，当初から中継機能を備えている方式である．DECT は物理層では周波数分割多重 (Frequency-Division Multiple-Access) による 10 個の搬送周波数に分けられ，各搬送周波数で時分割多重 (Time-Division Multiple-Access) により 10ms 長のフレームが 24 スロットにわけて利用される．24 スロットの内 0 番から 11 番までのスロットは，基地局から端末への下り回線 (downlink) 用に用いられ，12 番から 23 番までのスロットは端末から基地局への上り回線 (uplink) として使われる．

DECT での中継は，次のようにして行われる．基地局と中継局との間の下り回線が第 1 スロットを用い，上り回線が第 13 スロットを使っているものとする．中継局と端末との間の下り回線が第 3 スロット，上り回線が第 15 スロットを用いているものとする．この場合，基地局から端末への下り伝送は第 1 スロット，第 3 スロットを用いて行われ同一フレーム内に伝送が終了する．一方端末から基地局への伝送は，端末から中継局へ第 15 スロットを用いて伝送した後，中継局から基地局へは次のフレームの第 13 スロットを用いて行われる．このように DECT では，端末と同じ機構で中継局が実現される．

しかしながら，DECT の中継方式では，直接端末と基地局が接続されている場合には，同一フレーム内で一往復の通信が実現できるのに対して，中継局が一段介入するときには，一往復の通信に 2 フレームを要することになる．このことは，多段の中継はおおきな時間遅れを伴うことになり，第 3.5 節で述べた回線資源の制約によって 3 段以上の中継が系の性能に寄与しないことと合わせて，多段中継の有効性に制限を加えるものと考えられる．

3.6.2 中継端末および中継ルートの発見方法

Beacon 法

[7] において Aggelou は Beacon 法を提案している．ここでは，すべての端末が一定周期で BEACON メッセージを送出する．

端末が基地局 (BTS) と直接通信が可能であれば，LINK_TO_BTS フラッグが ON になっているメッセージを送出する．もし，端末が基地局と直接通信することができず，中継局を通じて基地局と通信可能であれば，中継局の識別子と中継局までの中継ホップ数とを記してある，RELAY_TO_BTS フラッグを ON にした BEACON メッセージを送出する．

基地局との直接通信も，中継局を介した通信も行うことができないでいる端末は，BEACON メッセージを監視し，LINK_TO_BTS, RELAY_TO_BTS フラッグを持った BEACON メッセージのうちで，中継ホップ数が最小の中継局を選べば，最短のホップ数で基地局に到達することができる．

総送信電力最小法

藤原らは [12] においてＣＤＭＡセルラ方式にマルチホップ中継を導入することを提案している．ＣＤＭＡの特性から各端末における干渉電力を最小にする中継局を選択することが重要であると論じている．藤原らは「総送信電力が最小となるマルチホップ経路選択法を提案している．

基地局および中継局は送信電力値情報 (TPI) を付けたパイロット信号を送出する．中継局は受信した TPI 値と受信 SIR (Signal-to-Interference Ratio) から，送り元局の所要送信電力 (BRTP) を算出し，BRTP および当該中継局の TPI を合計した新しい TPI 値を求める．この値が他の中継局から受けた TPI から算出した TPI

より小さければ，再びパイロット信号を送出する．最終的に端末に到達したパイロット信号から，中継局を定めることができる．

3.7 まとめ

本章では，アドホックネットワークをセルラ方式に適用した，アドホックリレー方式について議論した．アドホックリレー方式は，セルラ方式の性能を低下させる原因の一つであるデッドスポットの問題を，端末が中継機能を持つことによって解決しようとするものである．アドホックリレー方式を適用した系のトラヒック特性を理論的に計算する方法を示し，いくつかの計算例について議論した．たとえば端末の通信距離 (60) が，基地局通信距離 (200) の 1/3 程度であっても，呼損率を十分に改善でき，運ばれる呼量を確保できることを示した．また，三段以上の多段中継を行うことが，必ずしも呼損率の改善に寄与しないことを，シミュレーション結果に基づいて議論した．

アドホックネットワークを実現するためには多くの問題が解決されなければならず，その中には理論的な課題も多々ある．本報告では，解析を容易にするために端末がデッドスポットに入るという事象は，相互に独立であると仮定している．しかし，デッドスポットはビルの陰など比較的大きな障害物のために発生するのだから，ある端末がデッドスポットに在れば，地理的に隣接した端末もデッドスポットに入る可能性が高いと考えられる．なんらかの偏在性を仮定した解析が求められる．第２に，中継端末が持つ中継容量は，端末の処理能力の制限などから，何らかの上限を持たざるをえず，適切な中継容量を求める問題も課題となる．さらに，セルの周辺に在る端末は，隣のセルに属する端末によって，隣のセルの基地局へ中継してもらうという可能性もある．

また本章では，第２章と同じく，解析を容易にするためにセル中の端末が静止していると仮定した．しかし，移動はモバイルアドホックネットワークにおけるひとつの重要な要因である．文献 [13] は，１次元のサービスエリアにおける，二段

ワイアレスシステムの平均保留時間を理論的に解析したものである．このような手法を拡張し，本報告で扱った二次元平面における解析を行うことが一つの重要な課題である．これらの課題を解決してアドホックネットワークに関する基礎的な理論を構築することが必要である．

参考文献

[1] V. H. Mac Donald, "The cellular concept," Bell System Technical Journal, Vol. 58, No. 1, pp. 15-41, July, 1978..

[2] C. E. Perkins, "Ad hoc Networking", Addison-Wesley, 2001.

[3] K. Mase, M. Sengoku, S. Shinoda, "A Perspective on Next-Generation Ad Hoc Networks – A Proposal for an Open Community Network –", IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E84-A, No.1, pp.98-106, Jan. 2001

[4] 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司, "アドホックネットワーク," 電子情報通信学会誌, vol. 84, no. 2, pp. 127-134 Feb. 2001

[5] G. J. Pottie and W.J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors", Communications of the ACM, VOl.43, No.5, pp.51-58, May 2000

[6] K. Shorabi, J. Gao, V. Ailawadh, and G.J.Pottie, "Protocols for Self-Organizztion of a Wireless Sensor Network, IEEE Personal Communications, pp.16-27, October 2000

[7] G. N. Aggelou and R. Tafazolli, "On the Relaying Capability of Next-Generation GSM Cellular Networks," IEEE Personal Communications, pp.40-47 Feb. 2001

[8] 白尾恒吉 “確率・統計”, 理工系基礎の数学 10 朝倉書店, 1979

[9] J.F.C. Kingman, “Poisson Processes”, Oxford Science Publications, 1993.

[10] 秋丸春夫, 川島幸之助, “情報通信トラヒック-基礎と応用-”, 電子通信協会, オーム社,1990

[11] B.H.Walke “Mobile Radio Networks – Networking, Protocols, and Traffic Performance” Second Edition John Wiley & Sons, Ltd. 1998

[12] 藤原淳, 竹田真二, 吉野仁, 大津徹, 山尾泰 “ＣＤＭＡセルラパケット伝送方式へのマルチホップ接続適用による容量増大効果” 電子情報通信学会 信学技報 RCS2002-19,CQ2002-19 pp.11-14, April 2002

[13] 田中雄太, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司, “端末間直接通信と端末の移動の関係についての考察”, 2001 年電子情報通信学会ソサエティ大会, B-7-22, p. 211 (Sept. 2001)

第4章　結論

本研究では，次世代の無線モバイル通信で強く求められるであろう，周波数の有効利用とエリアカバレッジの問題を取り上げ，それらに寄与するであろうアドホックセルラネットワークの二つの形態について，理論的にそのトラヒック特性を与える方法を考察した．

第２章ではセルラシステムにアドホックネットワーキングを適用した直接通信ワイヤレスネットワークについて検討した．この章では直接通信ワイヤレスネットワークの性能を理論的に解析する方法を示した．この方法では，セルの大きさ，ノード間の直接通信範囲，セル内のトラヒック量，ノードの分布，呼の処理規則，トラヒックフローの挙動などを考慮にいれた．解析の方法を示し，数値計算例を示した．この結果から直接通信ワイヤレスネットワークのいくつかの特性を得ることができた．ノードに直接通信を許すことによって，呼損率を 1/3 程度に低く抑えることができることが明らかになった．呼損率の振る舞いがチャネル数 n 偶奇に依存していることが示された．また呼損率の振る舞いは，他のセルとの間で行われる通信トラヒックの流れに依存していることも示された．

ここで与えた理論的方法を直接通信ネットワークの設計に適用することができる．またこの方法を，チャネル資源の効果的利用という観点から見て，アドホックネットワーキングが有効に働く範囲を見つけることに用いることができる．アドホックネットワーキングをセルラシステムに応用する前に，この「適用範囲」を慎

重に検討するべきである．目標とする環境がこの「適用範囲」の外にあれば，アドホックネットワーキングを適用することはチャネル資源の有効利用という観点から見て，望ましくない．この論文で述べた適用範囲を推定する方法は，このような目的にとって有用である．

第３章では，アドホックネットワークをセルラ方式に適用した，アドホックリレーネットワークについて議論した．アドホックリレー方式は，セルラ方式のエリアカバレッジを低下させる原因の一つであるデッドスポット の問題を，端末が中継機能を持つことによって解決しようとするものである．アドホックリレー方式を適用した系のトラヒック特性を理論的に計算する方法を示し，いくつかの計算例について議論した．端末の通信距離が基地局の通信距離の 1/3 程度であっても，呼損率を十分に改善でき，運ばれる呼量を増大できることを示した．また，三段以上の多段中継を行うことが，二段中継に較べたときに必ずしも呼損率の改善に寄与しないことを，シミュレーション結果に基づいて議論した．別の表現をすれば，二段中継についての理論解析が３段以上の中継に対する非常に良い近似値を与えていると言える．

直接通信ワイヤレスネットワークの検討においてもアドホックリレーネットワークの検討においても，セルラーネットワークにアドホックネットワーキングを導入することによってトラヒック特性を向上させることができることが明らかになった．また，本論文で示した，理論的なトラヒック解析手法は，短い計算時間で非常に精度の良い計算結果を与える．幾何学的確率と２元トラヒックモデルを用いた解析手法は，本論文で示した問題以外にもさまざまなシステムの解析に有用であろう．

アドホックネットワークを開発するに際して我々が克服するべき問題は多々あ

る．これらの問題には多くの理論的課題も含まれている．たとえば，この論文では解析を容易にするためにセルの中のノードは移動しないと仮定した．しかしながら，移動はモバイルアドホックネットワークにおいて重要な要素である．[16] において，対象システムが一次元ではあるが，直接通信ワイヤレスネットワークにおける平均保留時間が理論的に解析されている．また，アドホックリレーネットワークでは，中継端末が持つべき中継容量の問題，デッドスポットの非独立性，隣のセルへの中継可能性なども今後検討すべき課題である．これらの問題を克服してアドホックネットワーキングの基礎的理論が確立されることが望まれる．

謝辞

本論文は，筆者が新潟大学大学院自然科学研究科（博士後期課程）において行った研究をまとめたものである．

本研究を遂行するにあたり，ご指導，ご教示をいただきました新潟大学仙石正和教授に心から御礼申し上げます．また．直接暖かい激励とご指導，ご教示をいただいた中野敬介助教授に心から感謝申し上げます．

本論文をまとめるにあたり，新潟大学間瀬憲一教授，山口芳雄教授，石井郁夫教授，菊池久和教授，ならびに山田寛喜助教授の各位には，ご討論と貴重なご助言をいただきました．ここで厚く御礼申し上げます．

また本研究の中で，議論に参加していただき多くの示唆と激励をいただきました，中央大学篠田庄司教授，新潟工科大学田村裕教授，新潟大学柄沢直之氏に謝意を表します．

有益な情報をいただいた筑波大学高木英明教授に感謝します．プログラム作成とデバッグを助けていただいた新潟大学田中雄太氏に感謝します．

元株式会社東芝マルチメディア研究所所長 傳幸 正敏氏には筆者に博士課程進学と研究の機会を与えていただきました．深く感謝いたします．

福井大学渡辺貞一教授，株式会社東芝 山田尚志主席技監のお二人には常に励ましと助言とをいただきました．深く感謝いたします．

研 究 業 績 一 覧

[論文]

(1) Akio Tanaka, Keisuke Nakano, Masakazu Sengoku , Shoji Shinoda "Analysis of Communication Traffic Characteristics of a Two-hop Wireless Network" IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E85-A, No.7, pp.1436-1444, July 2002

(2) 田中哲男，中野敬介，仙石正和，篠田庄司 "アドホックネットワーキ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 2002 年 12 月 掲載決定

[国際会議]

(1) Akio Tanaka, Keisuke Nakano, Masakazu Sengoku "An Effect of Application of Direct Communication to Cellular Systems on Teletraffic Characteristics" Proceedings of the 4-th International Conference on Multi-Dimensional Mobile Communications (MDMC'01), pp. 190-195 June, 2001

(2) Keisuke Nakano, Akio Tanaka, Masakazu Sengoku, Shoji Shinoda, "A Wireless Network Using ad-hoc Networking and its Performance Analysis" Proceedings of Japan-Korea Joint Workshop on Intelligent Systems and Mechatronics Formed in Network Space, pp98-102, November 11-13, 2001

[研究会報告]

(1) 田中哲男，中野敬介、仙石正和 "移動局間直接通信がセルのトラヒックに与える効果" 日本シミュレーション学会 多次元移動情報通信網自動設計技術研究専門委員会資料 2000 年 10 月

(2) 田中哲男，中野敬介、仙石正和 "アドホック方式とセルラ方式を併用した系のトラヒック解析" 電子情報通信学会 技術研究報告，Vol.101，No.492 pp.89-95, 2001 年 12 月

[全国大会]

(1) 田中哲男，中野敬介、仙石正和 "端末間直接通信のセル方式への適用がトラヒック特性に与える効果" 2001 年電子情報通信学会総合大会予稿集 B-7-46 2001 年 3 月