マルチホップ無線網における共通の点を持たない複数の経路に関する一考察

中野　敬介† 成田　賢史† 仙石　正和† 篠田　庄司††

† 新潟大学工学部　950–2181 新潟市五十嵐 2 の町 8050 番地
†† 中央大学理工学部　112–8551　東京都文京区春日 1–13–27
E-mail: †{nakano,sengoku}@ie.niigata-u.ac.jp, ††snarita@net.ie.niigata-u.ac.jp,
†††shinoda@elect.chuo-u.ac.jp

あらまし　本報告では，デッドスポットに存在する移動ノードと基地局をマルチホップ無線により接続することができるセルラシステムを考える．このようなセルラシステムにおいて，各ノードが中継できる能力に制限があるとし，この制限により，複数のノードと基地局は，共通の点を含まない複数の経路により接続されるとする．この場合に，これらの複数のノードが基地局との間にそれぞれ異なる経路を確保できる時間について考察を行う．この時間の平均値を求めるための手法について議論し，一つの手法を示す．得られた手法により，共通の点を含まない複数の経路を確保する際のネットワークの性質について議論する．

キーワード　マルチホップ無線ネットワーク，セルラ方式，移動，共通のノードを持たない経路

A Consideration on Internally Disjoint Paths in Multi-hop Wireless Networks

Keisuke NAKANO†, Satoshi NARITA†, Masakazu SENGOKU†, and Shoji SHINODA††

† Faculty of Engineering, Niigata University　2–8050, Ikarashi, Niigata 950–2181, Japan
†† Faculty of Science and Engineering, Chuo University　1–13–27, Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan
E-mail: †{nakano,sengoku}@ie.niigata-u.ac.jp, ††snarita@net.ie.niigata-u.ac.jp,
†††shinoda@elect.chuo-u.ac.jp

Abstract　This report considers a cellular system that can connect a base station and mobile nodes in dead spots. This report assumes that relaying capability of each node is limited. Because of the limited relaying capability, this report assumes that some internally disjoint paths are needed to connect some nodes to the base station. This report considers how to compute the time during which at least a path that has no nodes included in other paths is assigned to each of the mobile nodes. By using a technique shown in this report, this report discusses some characteristics of the cellular systems.

Key words　Multi-hop wireless network, Cellular system, Mobility, Internally disjoint paths

1. まえがき

マルチホップ無線ネットワークとは，移動ノード間を他の複数の移動ノードの中継により接続するネットワークであり，移動ノードの直接通信機能および中継機能により実現される．このネットワーク技術を用いることにより，移動ノードだけでネットワークを構築でき，無線アドホックネットワークと呼ばれる一時的なネットワークを構成することができる [1]．一方で，セルラ方式において，地形や建物の影響により，あるノードが固定基地局からの電波を受信できない，あるいは，固定基地局まで直接情報を送信できないような領域（デッドスポット）に存在する場合に，このノードと基地局をマルチホップ無線ネットワークを利用して接続するという応用も検討されている [2]．

このような応用を考えた場合，マルチホップ無線ネットワークが一時的なネットワークではなく，インフラの一部として利用されることを意味するので，高い信頼性が要求されることになる．しかし，上述のようにマルチホップ無線ネットワークの通信経路は無線リンクと移動ノードから構成されるため，この通信経路の連結性は，ノードの空間的な密度，分布，通信範囲の大きさ，移動パターン等，様々な要因の影響を受ける．よっ

て，信頼性保証を行うためには，これらの要因と連結性の関係を明らかにし，この関係に基づいて，制御できるパラメータを最適な値に設定する必要がある．

そこで，筆者らは，対象領域を1次元に限定した場合ではあるが，ノードがデッドスポットに入ってから，時間tの間に基地局と非連結になる確率および非連結になるまでの平均時間等を，移動を考慮したときのマルチホップ無線ネットワークの連結性を表す指標として考え，これらの指標と，ノードの空間的な密度，分布，通信範囲の大きさ，移動パターンとの関係について，理論および実験による特徴付けを行った[3]〜[5]．ただし，これらの解析においては，1つのノードが中継できる数に制限がなく，ノードと基地局の間に最低1つの経路があればネットワークは連結であると考えていた．

しかし，実際の環境を考えたとき，1つのノードが中継できる数に制限があることは大いに予想される．このような制限があるシステムにおいて，既にいくつかのノードが中継を行っている場合，新たな接続要求に対しては，中継できる数に余裕があるノードだけからなる新しい経路を構成する必要がある．つまり，ノードが中継できる数に制限があるという条件で，複数の経路を用意するためには，中継できる数に制限がない場合と比較して，より多くのノードが必要であるということになる．よって，信頼性の保証を考えるときにも，ノードが中継できる数に制限がある場合についての連結性の性質を明らかにする必要がある．

そこで，本報告では，ノードが中継できる数を1つに制限した場合において，デッドスポットに入った複数のノードが，基地局との間にそれぞれ1経路ずつを確保しなければならないという状況を考える．このような制限を与えた上で，これらのノードがデッドスポットに入った後も，マルチホップ無線回線を保持し続けられる時間について理論的に考察を行い，基本的な性質を明らかにする．

2. 仮定と問題

本報告では，以下のような仮定をおく．ノードは図1のような1次元の領域に存在し，すべて同速度vで右方向に移動していると仮定する．セルとデッドスポットの境界の座標をx_0とし，x_0上およびx_0の左側に存在するノードは基地局bsと直接通信することができ，x_0の右側にあるノードはbsと直接通信することはできないとする．解析の簡単化のため，mn_0に続いているノード群は，ある時刻のmn_0の位置を基準にして定数Δxおきの飛び飛びの位置に存在すると仮定する．ただし，これらの位置すべてにノードが存在する訳ではなく，各位置におけるノードの存在確率をp，存在しない確率を$1-p$として，ランダムなノードの配置を仮定する．mn_0に続くノード群とmn_0の関係を表すために，下記のようなa_iを用いる．mn_0のΔx後方にノードが存在するとき，$a_1=1$とし，存在しないときは0とする．a_0はmn_0に対応するとし，$a_0=1$とする．同様に，$i=2,3,\cdots$について，mn_0の$i\Delta x$後方にノードが存在するとき，$a_i=1$とし，存在しないときは0とする．図2に例を示す．

本報告では，各ノードが同時に1つだけ中継あるいは通信を行えると仮定する．このとき，デッドスポットに連続して入るk個のノード$mn_0, mn_1, mn_2, \cdots, mn_{k-1}$を考え，$mn_0$がデッドスポットに入ってから，これらの$k$個のノードすべてが基地局$bs$との間に，それぞれ共通な点を含まない通信経路を確保することができる平均時間を考える．よって，$a_0=1$，$a_1=1$，$\cdots$，$a_{k-1}=1$であるという条件のもとで考察する．ただし，bsは同時に複数のノードと接続できると仮定する．

ノード同士が直接通信できる範囲については，2つのノードを考え，互いの距離が$m\Delta x$以下であるとき，これらのノードは直接通信できると仮定する．ここで，$m \geq k$であるとする．

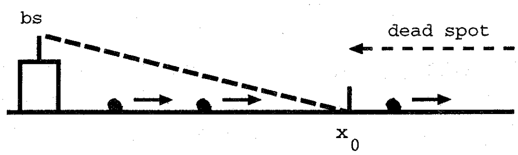

図1 セルとデッドスポット

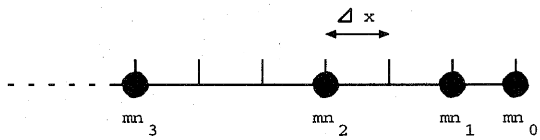

図2 $a_0=1, a_1=1, a_2=0, a_3=1, a_4=0, a_5=0, a_6=1$である場合の，$mn_0$の後方のノードの配置．

3. 解法と結果

$mn_0, mn_1, \cdots, mn_{k-1}$と$bs$を結ぶ経路として，各経路が共通の点を含まないようなk組の経路を考える．これらの経路が存在するための条件について考える．mn_{k-1}の後方に存在するノードにもmn_k，mn_{k+1}，$\cdots$と順番に名前を付ける．mn_0がデッドスポットに入った後，デッドスポットに存在しx_0の最も近くにあるノードをmn_iとして表す．mn_0からmn_iを考えて，これらのすべてのノードについて，それぞれ後方$m\Delta x$以内にk個以上のノードが存在すれば，mn_0, mn_k, mn_{2k}, mn_{3k}, $\cdots$という経路，mn_1, mn_{k+1}, mn_{2k+1}, mn_{3k+1}, $\cdots$という経路，$\cdots$，mn_{k-1}, mn_{2k-1}, mn_{3k-1}, mn_{4k-1}, $\cdots$という経路の計k本の連結な経路を構築できる．これらの経路は共通の点を含まない．ここで，mn_iとbsは，mn_{i+k}により接続され，mn_{i-1}とbsは，mn_{i-1+k}により接続され，$\cdots$，mn_{i-k+1}とbsは，mn_{i+1}により接続される．よって，mn_0, mn_1, mn_2, $\cdots$, mn_{k-1}とbsを結ぶ経路として，各経路が共通の点を含まないようなk組の経路が存在する．また，mn_0からmn_iを考えて，これらのノードのうち，あるノードの後方$m\Delta x$以内に$k-1$個以下のノードしか存在しないとき，明らかに共通の点を含まないようなk組の経路は存在しない．

つまり，mn_0がx_0からデッドスポットに移動した直後に，$m\Delta x$後方には，仮定から$mn_1, \cdots, mn_{k-1}$の$k-1$個のノー

ドは存在するが，このとき，mn_k が mn_0 の後方 $m\Delta x$ 以内に存在しなければ，この瞬間に mn_0，$\cdots$，mn_{k-1} が bs との間に別々の経路を持てないということになる．仮に，mn_0 から mn_{k-1} が別々の経路を確保できたとして，次に mn_1 がデッドスポットに入った直後に，mn_{k+1} が mn_1 の後方 $m\Delta x$ 以内に存在しないならば，この瞬間に mn_0，$\cdots$，mn_{k-1} は別々な経路を確保できなくなる．よって，上記のような k 個の経路が存在する時間は，$m\Delta x$ 後方に存在するノード数が $k-1$ であるノードがデッドスポットに入るまでの時間であると考えられる．

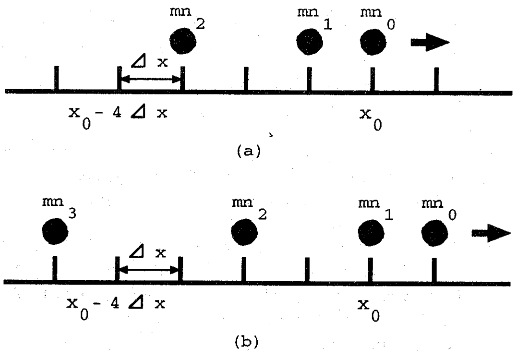

図 3　$m=4, k=2$ の場合に，2 つの経路を確保できなくなる例．

$m \neq k$ のとき，この時間は，$a_k, a_{k+1}, \cdots$ を考えて，以下のような 0 と 1 からなるパターンが現れるまでの時間となる．

- 長さ $m-k+1$ で，すべて 0.
- 長さ $m-k+2$ で，両端が 0 で，0 の数が $m-k+1$ 個.
- 長さ $m-k+3$ で，両端が 0 で，0 の数が $m-k+1$ 個.
- $\cdots$
- 長さ m で，両端が 0 で，0 の数が $m-k+1$ 個.

$m=k$ のとき，上記の時間は (0) が現れるまでの時間となる．これらのパターンを $S_1, \cdots, S_n$ で表し，パターン S_i の長さを ℓ_i で表す．例えば，$m=4$，$k=2$ の場合，$S_1=(000)$，$S_2=(0100)$，$S_3=(0010)$ である．

ランダムに現れる記号列にあるパターンが現れるまでの時間 $E(N)$ は以下のように求まる [6]．二つのパターン S_i と S_j を考えて，次式で定義される e_{ij} を用いる．

$$e_{ij} = \sum_{r=1}^{\ell} \frac{\epsilon_r(i,j)}{p_{c_1} \cdots p_{c_r}}. \tag{1}$$

ここで，$\epsilon_r(i,j)$ はパターン S_i が $c_1 \cdots c_r$ で終わり，S_j が $c_1 \cdots c_r$ で始まるときに 1 となり，それ以外は 0 となる．また，p_{c_i} は文字 c_i が現れる確率であり，$\ell = \min(\ell_i, \ell_j)$ である．このとき，以下の方程式が成り立つ．

$$\sum_{j=1}^{n} e_{ji}\pi_j = E(N) \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^{n} \pi_j = 1 \tag{3}$$

ここで，π_j はパターン S_j が最初に現れる確率である．ここでは，文字 1 が現れる確率を p，文字 0 が現れる確率を $1-p$ としているので，この方程式を解くことにより，$E(N)$ を p の関数として求めることができる．例えば，$m=4$，$k=2$ の場合，$E(N)$ は $a_k, a_{k+1}, a_{k+2}, \cdots$ の列において，上記の S_1，S_2，S_3 のいずれかが最初に現れるまでの時間となる．

よって，mn_0 がデッドスポットに入ってから，k 個の経路を保持できる時間は，$\{E(N)-(m-k+1)\}\frac{\Delta x}{v}$ として計算できる．ここで，$(m-k+1)$ が $E(N)$ から引かれているのは，mn_0 が x_0 に存在している時点では，x_0 と $x_0 - m\Delta x$ の間に，すでに，$a_k, a_{k+1}, \cdots, a_m$ が現れているためである．

$m=4$ の場合に，$k=1$，$k=2$，$k=3$，$k=4$ のそれぞれについて，考慮すべきパターンと $E(N)$ を p で表した式は以下のようになる．

$k=1$ のとき，パターンは，$S_1=(0000)$ だけであり，

$$E(N) = \frac{1}{1-p} + \frac{1}{(1-p)^2} + \frac{1}{(1-p)^3} + \frac{1}{(1-p)^4} \tag{4}$$

となる．

$k=2$ のとき，パターンは，上記のように $S_1=(000)$，$S_2=(0100)$，$S_3=(0010)$ であり，

$$E(N) = \frac{1}{1-p} + \frac{1}{(1-p)^2} + \frac{1}{(1-p)^3}\frac{(1-p+p^2)^2}{1+p+p^3} \tag{5}$$

となる．

$k=3$ のとき，パターンは，$S_1=(00)$，$S_2=(010)$，$S_3=(0110)$ であり，

$$E(N) = \frac{1}{1-p} + \frac{1}{(1-p)^2}\frac{1}{1+p+p^2} \tag{6}$$

となる．

$k=4$ のとき，パターンは，$S_1=(0)$ であり，

$$E(N) = \frac{1}{1-p} \tag{7}$$

となる．$m=4$ 以外の場合も，同様に $E(N)$ を求めることができる．

$m=2, m=3, m=4$ の場合の数値例を図 4 から図 6 にそれぞれ示す．ここでは，$v=1$ としている．また，距離を通信範囲の大きさで規格化している．図から，同一の m について，確保すべき経路数が増加するに従い，経路を確保できる時間がどのように減少するかがわかる．上記の式からも，確保する経路数の増加に伴い，$E(N)$ が減少し，その結果，図のような特性を示すことを推定できる．

また，確保すべき経路数を 2 に固定し，m を 2, 3，4 と変化させた場合の結果を図 7 に示す．この図では，横軸を mp としているので，通信範囲に存在するノード数の平均が等しい場合の特性を比較できる．図から，m が大きくなるに従い，経路を確保できる時間は減少することがわかる．つまり，ノードが存在しうる場所が増えることにより，連結性が悪くなることがわかる．

4. あとがき

本報告では，各ノードが中継を行える数を 1 に制限した場

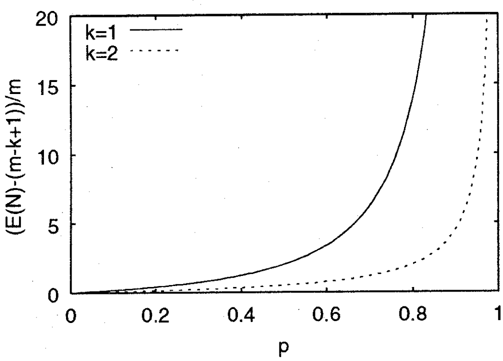

図4 $m=2$ であるときに，複数の経路を確保できる時間.

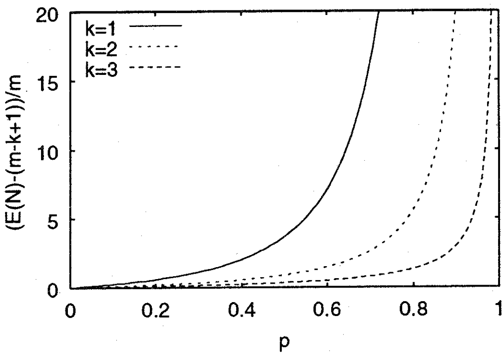

図5 $m=3$ であるときに，複数の経路を確保できる時間.

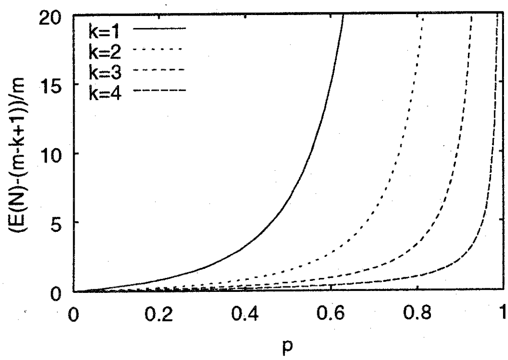

図6 $m=4$ であるときに，複数の経路を確保できる時間.

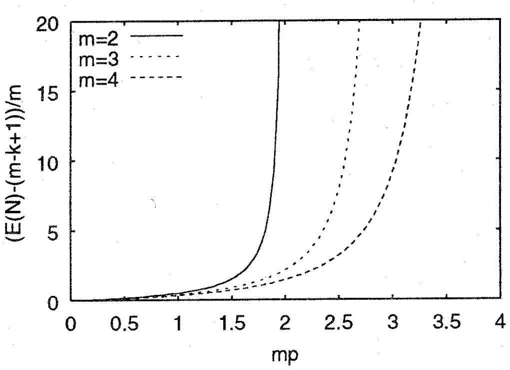

図7 $m=2,3,4$ のとき，2つの経路を確保できる時間.

合に，複数のノードと基地局を結ぶ複数の経路を確保できる時間を考察し，この時間を計算する一手法を示した．ここでは，ノードがすべて同一方向に同速度で移動し，ノードはある定数の定数倍の間隔でランダムに配置されるという限定された場合を考えたが，これらの条件と異なる条件下での考察については，今後の課題である．

また，本報告で用いた手法と同様にして，あるノードと基地局の通信を k 個の異なる経路に分散して行うことができる時間についても考えることができる．このように通信経路を分散することにより，特定のノードの極端な電力消費や，特定のノードへの高い負荷を軽減することができ，本手法は，このようなマルチホップ無線ネットワークの問題点を軽減するための手法を用いた場合の連結性の解析にも利用できると考えられる．

文　献

[1] C. E. Perkins, Ad Hoc Networking, Addison-Wesley, 2001.
[2] G. N. Aggelou et al., On the relaying capability of next-generation GSM cellular networks, IEEE Personal Communications, pp. 40-47, Feb. 2001.
[3] 中野他, “マルチホップ無線網におけるノードの移動とコネクティビティに関する考察,” 信学技報, RCS2002-2, Apr. 2002.
[4] K. Nakano et al., “Effect of Mobility on Connectivity of Mobile Multi-hop Wireless Networks,” Proc. IEEE VTC2002-Spring, May 2002.
[5] 中野他, “マルチホップ無線網における連結性と移動の関係に関する考察,” 2002 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, SB-3-5, Sept. 2002.
[6] G. ブロム他, 確率問題ゼミ, Springer-Verlag, 1995.