

アドホックネットワークを適用したセルラシステムのトラヒック特性の解析

田中 哲男^{†a)} 中野 敬介^{††} 仙石 正和^{††} 篠田 庄司^{†††}

Analysis of Communication Traffic Characteristics of a Cellular System with Ad-hoc Networking

Akio TANAKA^{†a)}, Keisuke NAKANO^{††}, Masakazu SENGOKU^{††},
and Shoji SHINODA^{†††}

あらまし セルラ方式ではすべ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。本論文では、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。

キーワード アドホックネットワーク、セルラ方式、ネットワーク、通信トラヒック

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どうし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ク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]。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クを適用するという考え方がある。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 [4]。例えば、図 1 における端末 A のように、デッドスポットにあるときに、端末 B に中継してもらうことによって、端末 A は基地局と通信できる。

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もち込んだものである。本論文では、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、様々な問題、例えば中継端末を見つけて通信を成立させる方法、

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市
Graduate School of Science and Technology, Niigata University,
Niigata-shi, 950-2181 Japan

^{††} 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市
Department of Information Engineering, Niigata University,
Niigata-shi 950-2181 Japan

^{†††} 中央大学理工学部電気電子情報通信工学科, 東京都
Department of Electrical, Electronic and Communication
Engineering, Chuo University, Tokyo, 112-8551 Japan

a) E-mail: akiotnk@ieee.org

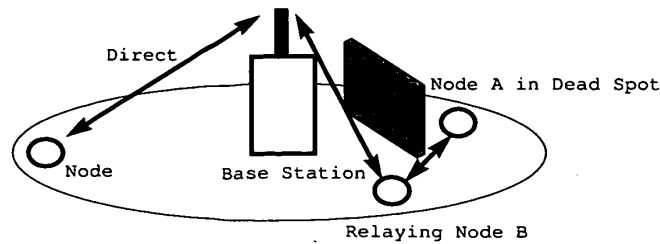


図1 中継による基地局との接続

Fig.1 Connection to the basestation by relaying capability of a node.

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 [4] は、これらの問題を解決する一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、文献[4]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、本論文では、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。

筆者らは、既に別の形態のアドホック方式とセルラ方式を併用した系の特性を議論した [5], [6]。そこでは、同一セル内の端末が相互に通信を行うときに、直接通信が可能ならば基地局の中継機能によらずに直接に通信を行うものであった。これらの論文で用いた理論的計算方法を、今回のデッドスポット問題にも適用できることを示す。

2. モデル

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、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、端末どうし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。端末どうし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。

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 πr_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。また一つのセルには n 個の回線が割り当てられていることとする。

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。

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。本論文では一つのセルのなか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ある確率が異なるものとしているので、 $r_2 < Y \leq r_1$ 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一つ使用するものとする。

アドホックリレー系では、端末どうしは互いの距離が 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あることがありうるから、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ある確率は $1 - p_d$ 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。

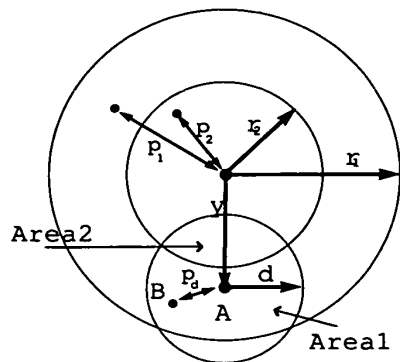


図 2 デッドスポットのモデル
Fig. 2 A model for dead spot coverage.

また、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なく、かつ、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 回線合わせて 2 回線分使用するものとする。

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。本論文では、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。

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は、例えば、Aggelou [4] に示されている。文献 [4] では、端末はセルラ系の通信とアドホック系の通信との両方の能力をもつ端末が提案されている。中継端末を見つける方法として、ビーコン法が提案されている。端末は自分自身の呼とともに、複数の中継を同時に行うことができるものである。

3. 解 析

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う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じた場合を考える。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、

$$P(B|A) = p_2 \tag{1}$$

$$P(B|\bar{A}) = p_1 \tag{2}$$

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 [7] により、

$$\lambda_1 = \lambda_c P(B) \tag{3}$$

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られるので、

$$\begin{aligned} P(B) &= P(B|A)P(A) + P(B|\bar{A}) \cdot P(\bar{A}) \\ &= p_2 \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} + p_1 \left(1 - \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

よって、系に加わる呼の到着率は、

$$\lambda_1 = \lambda_c \left\{ p_2 \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} + p_1 \left(1 - \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} \right) \right\} \tag{5}$$

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、

$$E_n(a_1) = \frac{\frac{a_1^n}{n!}}{\sum_{i=0}^n \frac{a_1^i}{i!}} \tag{6}$$

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、

$$\lambda_{ds} = \lambda_c P(\bar{B}) = \lambda_c (1 - P(B)) \tag{7}$$

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、

$$B_c = \frac{a_1 E_n(a_1) + a_{ds}}{a_1 + a_{ds}} \quad (8)$$

と定義する。\$B_c\$ はアドホックな中継が行われな、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。

3.2 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 \$\lambda_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 \$\lambda_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 \$\lambda_2\$ を検討する。一つのセルの中に存在する端末に関して、前記の事象 \$A\$, \$B\$ のほかに次の事象 \$C\$ を考える。

事象 \$C\$: 今考えている端末に対して、基地局との通信の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 \$\bar{B}\$ と事象 \$C\$ は独立であると仮定する。また事象 \$\bar{A}\$ の条件下でも事象 \$\bar{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 \$\bar{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 \$\lambda_2\$ は

$$\lambda_2 = \lambda_c \cdot P(\bar{B} \cap C) \quad (9)$$

と表される。以下 \$\lambda_2\$ を計算する式を求める。

$$\begin{aligned} P(\bar{B} \cap C) &= P(\bar{B} \cap C | A) \cdot P(A) + P(\bar{B} \cap C | \bar{A}) P(\bar{A}) \\ &= P(\bar{B} | A) P(C | A) P(A) + P(\bar{B} | \bar{A}) P(C | \bar{A}) P(\bar{A}) \\ &= (1 - p_2) P(C | A) \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} \\ &\quad + (1 - p_1) P(C | \bar{A}) \frac{\pi r_1^2 - \pi r_2^2}{\pi r_1^2} \end{aligned} \quad (10)$$

である。

次に \$P(C | \bar{A})\$ と \$P(C | A)\$ を求める。端末と基地局との間の距離を表すランダム変数 \$Y\$ の確率密度関数 \$f(y)\$ は、\$f(y) = 2\pi y / \pi r_1^2\$ である。距離 \$Y\$ が \$r_2 < Y \leq r_1\$ という条件付きでの確率密度関数は

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

$$= \frac{2y}{r_1^2 - r_2^2} \quad (11)$$

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、

$$P(C | \bar{A}) = \int_{r_2}^{r_1} q(y) f(y | r_2 < Y \leq r_1) dy \quad (12)$$

である。

同様にして、

$$f(y | 0 < Y \leq r_2) = \frac{\frac{2\pi y}{\pi r_1^2}}{\frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2}} = \frac{2y}{r_2^2} \quad (13)$$

として、

$$P(C | A) = \int_0^{r_2} q(y) f(y | 0 < Y \leq r_2) dy \quad (14)$$

である。

次に \$q(y)\$ を導く。面積 \$S\$ の中に一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。図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\$ の円及び半径 \$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。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、領域2に存在する端末は確率 \$p_2\$ で基地局と通信することができる。領域1、領域2それぞれにおける中継端末候補数は、Coloring 定理によってポアソン分布に従うから、対基地局デッドスポットに存在しない端末の空間的な密度はそれぞれの領域で \$p_1 \lambda_s\$, \$p_2 \lambda_s\$ と表すことができる。また、これらの中継端末候補が対端末デッドスポットに存在せず、端末 \$A\$ と通信できる確率は \$p_d\$ である。したがって、1個以上の中継端末が存在する確率 \$q(y)\$ は

$$q(y) = 1 - \exp(-p_d p_1 \lambda_s S_1) \exp(-p_d p_2 \lambda_s S_2) \quad (15)$$

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。式 (15) を見ると、 $q(y)$ を定める本質的なパラメータは、 $p_1, p_2, p_d \cdot \lambda_s$ の三つである。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。

以上の結果を用いて、式 (9)~(15) 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 (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 $P(\bar{B} \cap \bar{C})$ で呼は、始めから呼損となる。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。多元トラフィック理論 [8] 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。

$$B'_1 = \sum_{j=0}^s P_{n-2j,j} \\ = P_{0,0} \sum_{j=0}^s \frac{\alpha^{n-2j} \beta^j}{(n-2j)! j!} \quad (16)$$

$$B'_2 = \sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=n-2(j+1)+1}^{n-2j} P_{i,j} + \sum_{i=0}^k P_{i,s} \\ = \left(\sum_{j=0}^{s-1} \sum_{i=n-2(j+1)+1}^{n-2j} \frac{\alpha^i \beta^j}{i! j!} + \frac{\beta^s}{s!} \sum_{i=0}^k \frac{\alpha^i}{i!} \right) \\ \times P_{0,0} \quad (17)$$

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、 $\alpha = \lambda_1/\mu$ 、 $\beta = \lambda_2/\mu$ として、

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

で、 $k = n \bmod 2$ 、 $s = \lfloor n/2 \rfloor$ である。ただし、 $\lfloor t \rfloor$ は t を超えない最大の整数を表す。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。本論文では、

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存在し、そのすべてが呼損となる。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。

$$B_1 = \frac{\lambda_1/\mu}{\lambda_1/\mu + \lambda_2/\mu + \lambda_3/\mu} B'_1 \quad (18)$$

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

$$B_2 = \frac{\lambda_2/\mu}{\lambda_1/\mu + \lambda_2/\mu + \lambda_3/\mu} B'_2 \quad (19)$$

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、

$$B_3 = \frac{\lambda_3/\mu}{\lambda_1/\mu + \lambda_2/\mu + \lambda_3/\mu} \quad (20)$$

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

$$B = B_1 + B_2 + B_3 \quad (21)$$

で与えられる。

4. 計算例と議論

4.1 呼損率

式 (8) 及び式 (18)~(21) 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。本章では計算結果、シミュレーション結果を参照しながら議論を行う。以下の説明のなかでは三つの指標 p_1, p_2, rr をまとめて通信可能指標 P_c と呼び、三つ組 (p_1, p_2, rr) で表記する。

図 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あると仮定していることになる。 B_c は式 (8) による呼損率、すなわち、端末に中継能力をもたせない、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 (18)~(20) 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

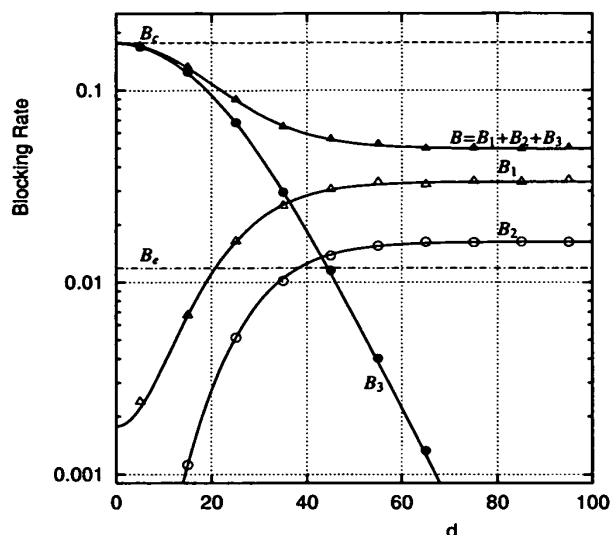


図3 $P_c = (0.8, 0.9, 80)$ の場合の呼損率の計算例 (線は理論値, $\blacktriangle, \bigcirc, \blacksquare$ はシミュレーションの結果を表す)
 Fig. 3 Blocking rates for $P_c = (0.8, 0.9, 80)$ (lines show theoretical calculations and points show the result of simulation).

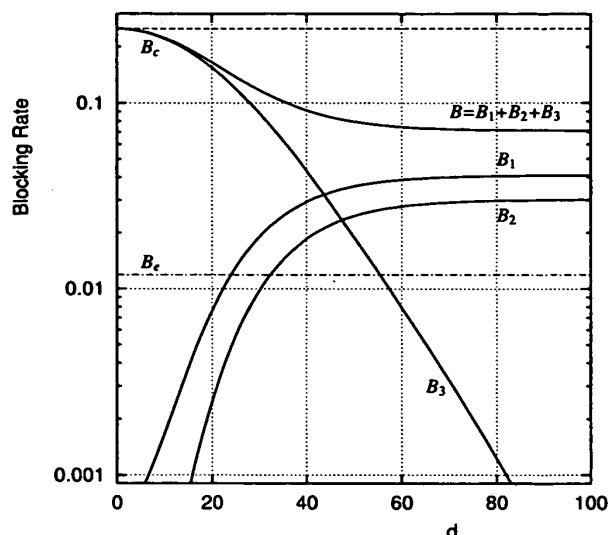


図4 $P_c = (0.7, 0.9, 70)$ の場合の呼損率の計算例 (その他の条件は図3の場合と同じ)
 Fig. 4 Blocking rates for $P_c = (0.7, 0.9, 70)$.

図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 以上では、 B_3 は 0.002 以下になって、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。この領域では呼損率 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もたない通常のセルラ方式の呼損率 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4に $P_c = (0.7, 0.9, 70)$ の場合と、図5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4の $P_c = (0.7, 0.9, 70)$ の場合、 $d > 75$ の領域で B_3 がほぼ 0 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5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、逆のことがいえる。

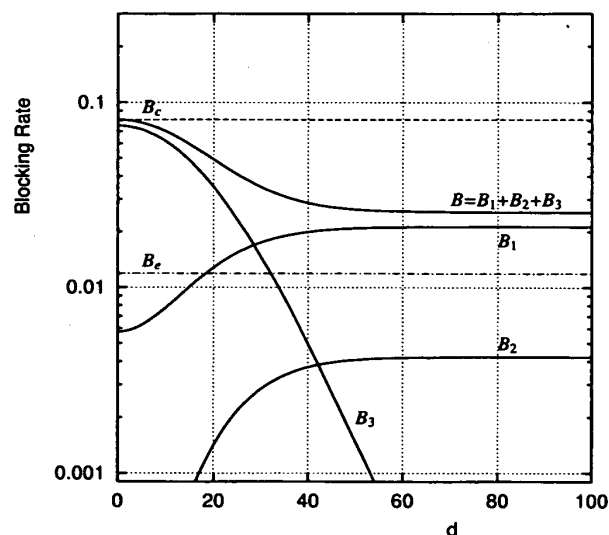


図5 $P_c = (0.9, 1.0, 90)$ の場合の呼損率の計算例 (その他の条件は図3の場合と同じ)
 Fig. 5 Blocking rates for $P_c = (0.9, 1.0, 90)$.

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。

$$a_c = a_1(1 - B'_1) + a_2(1 - B'_2) \quad (22)$$

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6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 10~40 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

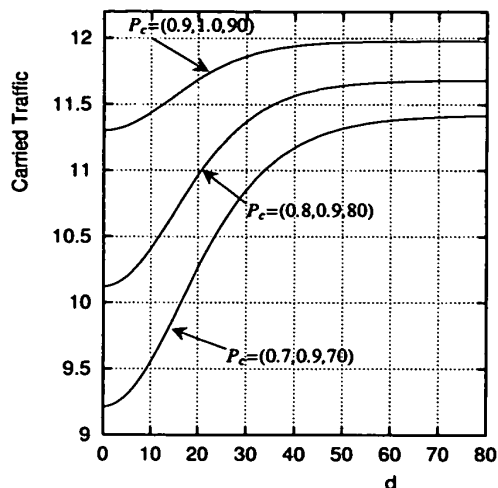


図 6 様々な P_c に対する運ばれた呼量. 計算の条件は図 3 の場合と同じ
 Fig. 6 Carried traffic for several dead spots conditions.

ることがわかる. $P_c = (0.9, 1.0, 90)$ のときには端末の通信範囲が 50 以上になれば呼量の改善が飽和に達し, $P_c = (0.7, 0.9, 70)$ のときには通信範囲が 70 以上になって初めて改善が飽和に達している.

5. 多段中継

前章までで, アドホックリレー系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ができる [2], [4]. 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, シミュレーション結果を用いて議論する.

図 7 に, シミュレーション結果を示す. シミュレーションに用いたモデルは 2. 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, $h+1$ 個の回線を使用するものとする. この図には, 二段中継だけを許したときの呼損率の理論値も実線で示してある. 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ない. $20 < d < 40$ 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 8 は, $P_c = (0.6, 0.7, 50)$, すなわち対基地局デッ

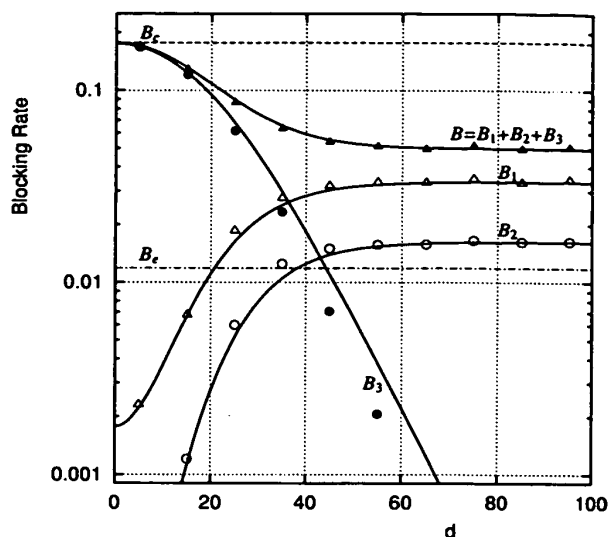


図 7 多段中継の効果のシミュレーション ($P_c = (0.8, 0.9, 80)$, その他の条件は図 3 の場合と同じ. ただし実線は二段中継を行うときの理論値)
 Fig. 7 A result of simulation for more than two hop relaying (lines show the theoretical calculation for two-hop relaying)

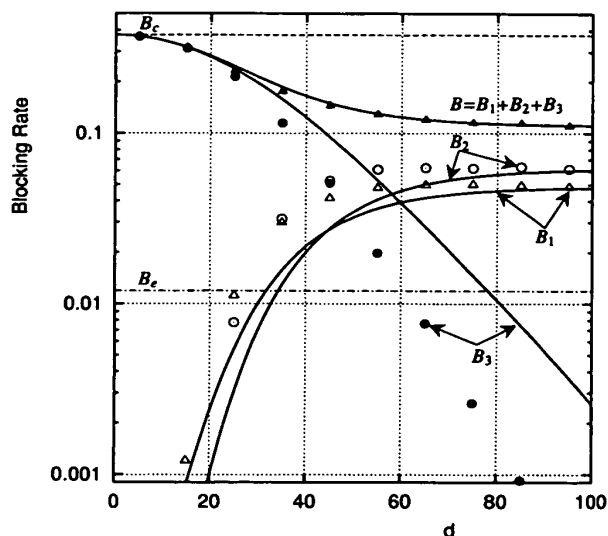


図 8 多段中継の効果のシミュレーション ($P_c = (0.6, 0.7, 50)$, その他の条件は図 3 の場合と同じ. ただし実線は二段中継を行うときの理論値)
 Fig. 8 Another result of multi-hop simulation for dead spot rich environment.

ドスポットにあ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たときのシミュレーション結果である. 実線はやはり二段中継までを許したときの理論値である.

この図 8 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、中継末端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 7 及び図 8 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末端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 9 は、図 7 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。例えば、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 3,500 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 にしかすぎず、四段中継が行われた呼の数は 20 しか

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。 $P_c = (0.8, 0.9, 80)$ という条件のもとでは、対基地局デッドスポットにある端末が発した呼に対して、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 10 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 9 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、中継末端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、更に中継末端を探すためである。多段中継は、端末が対基地局デッドスポットにある確率が高いときに、中継末端をよりよく見つけ出すという効果をもたらすといえる。しかしながら図 8 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 9、図 10 の双方ともに、 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、そのなかに存在する中継末端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

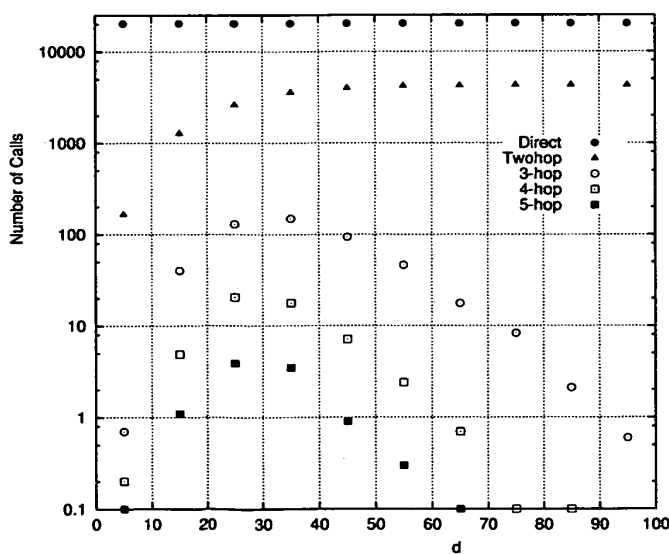


図 9 多段中継の生起数 ($P_c = (0.8, 0.9, 80)$ の場合)
Fig. 9 A plot of number of h -hop calls generated while multihop relaying.

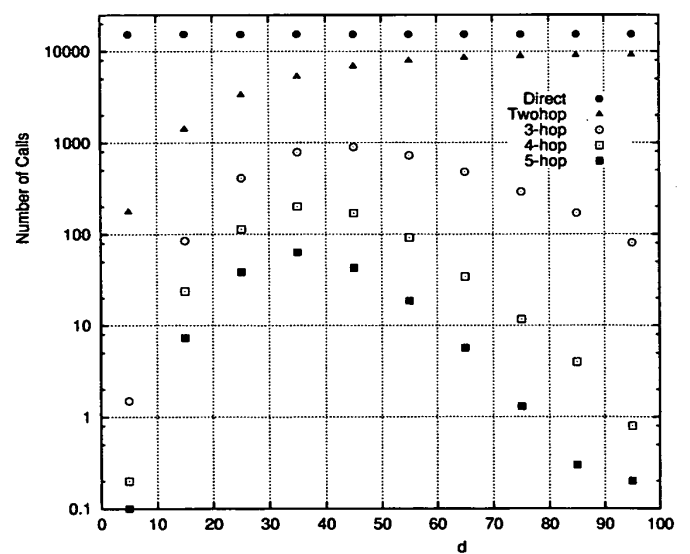


図 10 多段中継の生起数 ($P_c = (0.6, 0.7, 50)$ の場合)
Fig. 10 Another plot of number of h -hop calls generated in dead spot rich environment.

論文/アドホックネットワークを適用したセルラシステムのトラフィック特性の解析

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。

6. むすび

本論文では、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、端末が中継機能をも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フィ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。例えば、端末の通信距離が60程度で、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ない。そのなかには理論的な課題も多々ある。例えば、中継端末がもつべき中継容量の問題は、その課題の一つである。本論文では、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。これが独立ではない場合の解析も必要である。また本論文では、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一つの重要な要因である。文献[9]は、一次元のサービスエリアにおける、二段ワイヤ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、本論文で扱った二次元平面における解析を行うことや、その他の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。

謝辞 日ごろ、議論に参加して頂き多くの示唆と激励を頂く、新潟大学間瀬憲一教授、柄沢直之氏、新潟工科大学田村裕教授に謝意を表します。また、本論文に対し有益な御指摘を頂いた査読者の方々に感謝します。

文 献

- [1] V.H. Mac Donald, "The cellular concept," Bell Syst. Tech. J., vol.58, no.1, pp.15-41, July 1978.
- [2] C.E. Perkins, Ad hoc Networking, Addison-Wesley, 2001.
- [3] 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," 信学誌, vol.84, no.2, pp.127-134, Feb. 2001.

- [4] G.N. Aggelou and R. Tafazolli, "On the Relaying Capability of Next-Generation GSM Cellular Networks," IEEE Personal Commun., pp.40-47, Feb. 2001.
- [5] A. Tanaka, K. Nakano, and M. Sengoku, "An effect of application of direct communication to cellular systems on teletraffic characteristics," Proc. The 4th International Symposium on Multi-dimensional Mobile Communications (MDMC'01), pp.190-195, June 2001.
- [6] A. Tanaka, K. Nakano, M. Sengoku, and S. Shinoda, "Analysis of Communication Traffic Characteristics of a Two-hop Wireless Network," IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Commun. & Comput. Sci., vol.E85-A, no.7, pp.1436-1444, July 2002.
- [7] J.F.C. Kingman, Poisson Processes, Oxford Science Publications, 1993.
- [8] 秋丸春夫, 川島幸之助, 情報通信トラフィック—基礎と応用—, 電子通信協会, オーム社, 1990.
- [9] 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 信学ソ大, B-7-22, p.211, Sept. 2001.

(平成14年3月29日受付, 7月22日再受付)



田中 哲男 (正員)

昭44 東大・教養・基礎科学卒。同年(株)東芝総合研究所勤務。オペレーティングシステム, パターン認識技術の応用, マルチメディア処理, コンテンツ保護などの研究開発に従事。現在, 同社コアテクノロジーセンタ所属。平10より新潟大大学院自然

科学研究科在学中。平13年度情報処理学会業績賞受賞。IEEE, 情報処理学会各会員。



中野 敬介 (正員)

平元新潟大・工・情報卒。平6 同大大学院博士課程了。現在, 新潟大助教授。この間, 平11 イリノイ大アーバナ・シャンペーン校客員研究員。移動通信, ネットワークに関する研究に従事。工博。平8年度本会論文賞, IEEE ICNNSP'95 最優秀論文賞

受賞。



仙石 正和 (正員:フェロー)

昭 42 新潟大・工・電気卒. 昭 47 北大大学院博士課程了. 同年同大・工・電子助手, 新潟大・工・情報助教授を経て, 現在, 同教授. 回路網理論, グラフ・ネットワーク理論, 情報伝送特に移動通信の研究に従事. 工博. 平 3, 7, 8, 9 年度本会論文賞, IEEE ICNNSP'95 最優秀論文賞受賞. 著書「演習グラフ理論」(共著)等. IEEE Fellow, 情報処理学会会員.



篠田 庄司 (正員:フェロー)

昭 39 中央大・理工・電気卒. 昭 48 同大大学院理工学研究科電気工学専攻了. 現在, 同大理工学部電気電子情報通信工学科教授. 回路, ネットワーク, システムの解析, 診断, 制御の研究に従事. 工博. 平 3, 8, 9 年度本会論文賞, IEEE ICNNSP'95 最優秀論文賞受賞. 著書「回路論入門(1)」ほか. IEEE Fellow.