セルラ移動通信系におけるクリークパッキングとダイナミックチャネル割当て

中野　敬介[†]　仙石　正和[††]　篠田　庄司[†††]　阿部　武雄[††††]

Clilue Packing and Dynamic Channel Assignment in Cellular Mobile Communication Systems

Keisuke NAKANO[†], Masakazu SENGOKU[††], Shoji SHINODA[†††], and Takeo ABE[††††]

あらまし　本論文は，移動通信システムにおけるダイナミックチャネル割当て（DCA）と通信トラヒックに関する研究成果について述べたものである．厳密に解析することは難しいと言われているDCAの通信トラヒックの近似的な解析法を提案し，DCAの性質について考察した．Raymondにより，最適な割当てを常に行うDCAのモデルとしてクリークパッキングが提案されている．本論文では，従来とは異なる，クリークパッキングの呼損率の解析法を提案した．提案した解析法における近似式は，アーランB式の線形結合の形で与えられ，広く使用されているアーランB式から得られる値を用いて，計算も簡単に行うことができる．近似式による数値がシミュレーション結果と十分に一致することも示した．一方，多くのDCAは最適にチャネル割当てを行うことができるわけではない．ここでは，必ずしも最適ではないFirst-Available法のようなDCAを，クリークパッキングを用いてモデル化することに関しても検討を行った．DCAをクリークパッキングでモデル化でき，クリークパッキングの呼損率の近似式を用いて呼損率を計算できることを数値実験値から明らかにしている．

キーワード　セルラシステム，ダイナミックチャネル割当て，クリークパッキング，呼損率，First-Available法

1. まえがき

移動通信システムにおいて，加入者は急増し，使用できる周波数帯は限られている．多くの加入者を収容するためには，周波数帯の有効利用は重要である．そのため，現在の多くの移動通信システムはセルラ方式[1]を採用している．セルラ移動通信システムのサービスエリアはセルと呼ばれるエリアに分割される．セルラ方式においては，チャネル（周波数帯）を有効に利用するため，チャネルは干渉が十分小さいセル間で繰り返し再利用される．同一チャネル間干渉が互いに無視できない二つのセルは互いに干渉セルと呼ばれ，同一のチャネルを割り当てることはできない．セルvの干渉セルを考えるとき，v自身もvの干渉セルであるとする．チャネルの割当てを行う方法（チャネル割当て法)が，周波数帯の利用効率に影響を及ぼすため，効率の良いチャネル割当て法の開発は重要な課題であり，従来からさまざまな方法が提案されている[2]～[4]．チャネル割当て法は固定チャネル割当て法(Fixed Channel Assignment: FCA）とダイナミックチャネル割当て法（Dynamic Channel Assignment: DCA)に大別される．FCAにおいて，セルへのチャネルの割当ては，時間的に変化しない．一方，DCAは，システムに対するチャネルの割当てを時間的に積極的に変化させる．呼量が比較的小さいときにはDCAが，FCAよりも優れており，呼量が大きくなれば逆の結果になるといわれている[4]．FCAにおいて，一つのセルで使用できるチャネル数は常に一定であり，あらかじめセルに対して割り当てられているチャネルがすべて使用されている場合にだけ生起呼は接続されない．よって，一つのセルに割り当てられるチャネル群は完全線群として考えることができる．呼が通話中に移動

† 新潟工業短期大学，新潟市
Niigata College of Technology, Niigata-shi, 950-21 Japan
†† 新潟大学工学部，新潟市
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan
††† 中央大学理工学部，東京都
Faculty of Science and Technology, Chuo University, Tokyo 112 Japan
†††† 新潟工科大学，柏崎市
Niigata Institute of Technology, Kashiwazaki-shi, 945 Japan

しないことを仮定すれば，ポアソン呼に対する呼損率をアーランB式を用いて計算することができる．また，ハイウェイのような1次元セルラシステムにおいて，ハンドオフも考慮して，呼損率の近似計算を行うことも検討されている[5]．一方，DCAにおいては，基本的にすべてのセルで任意のチャネルを使用できる．しかし，一つのセルで使用できるチャネル数は干渉セルにおけるチャネルの使用状況に依存するため，解析の際には不完全線群として考える必要がある．このとき，システムにおけるチャネル割当ての状態は組合せ的になり，チャネル数，セル数が大きくなれば，組合せの数は膨大なものとなる．そのため，通信トラヒック特性（例えば呼損率）を厳密に解析的に求めることが難しいとされている[6]．そのため，近似的な解析手法もいくつか提案されている．First-Available法のような単純なDCAの呼損率の近似解析[6]，[7]，また，理想的な最適化を行った場合のDCAの呼損率の近似解析[8]～[11]が行われている．最適なDCAをクリークパッキングと呼ばれるチャネル割当て法でモデル化した場合の解析も行われている[12]．しかし，近似手法自体も簡単ではなく，多くの場合，DCAの呼損率の算出はシミュレーションに頼っているのが現状である．

本論文においては，主にクリークパッキングについて検討を加える．サービスエリア内のすべてのセルの集合を V で表す．集合 V の部分集合 c において，どの相異なる二つのセルが互いに干渉セルであるとき，c を V におけるクリークと呼ぶ．任意のクリーク c について，(チャネル数)≧(c に接続されている呼数)が常に成り立つ．なぜなら，クリーク内ではチャネルの再利用はできないからである(注1)．DCAにより生起呼にチャネルを割り当てるとき，呼が生起したセルを含むクリークの中で，(チャネル数)＝(クリーク内に接続されている呼数）という条件が成り立つクリークが存在する場合を考える（ここでの呼数には生起呼は含まれないとする)．このとき，どのようなDCAを用いても生起呼にチャネルを割り当てることはできない．しかし，呼が生起したとき，この条件が成り立つクリークが存在しない場合でも，DCAを用いるときには，生起呼にチャネルを割り当てられない場合がある．クリークパッキングにおいては，呼が生起したセルを含むすべてのクリークにおいて，(チャネル数)＞(クリーク内に接続されている呼数）であるときには，生起呼は接続され，(チャネル数)＝(クリーク内に接続されている呼数）であるようなクリークが存在する場合にだけ接続されない．つまり，クリークパッキングは常に完全な最適化を行えるDCAの近似的なモデルであると考えられる．

本論文では，文献[12]と異なるアプローチによりクリークパッキングの呼損率を解析する．前述のとおり，DCAの解析は難しく，また近似解析も複雑で，必ずしも容易に行えるというものでもない．そこで本論文においては，計算が簡単に行える解析法を考案することを一つの目的とした．クリークパッキングの呼損率を計算できる近似式を導出し，導出した式の評価も行う．

クリークパッキングは最適なDCAの一つのモデルであると述べたが，新たな試みとして，必ずしも最適化を完全に行うことができないDCAをクリークパッキングでモデル化することについても検討する．最近，盛んに研究されている分散型DCA[3]においても再配置接続のような空間的な最適化が難しく，このような方法を評価するためにも重要である．ここでは，クリークパッキングの呼損率の式を用いて，生起呼量とシミュレーションを用いて求めたDCAの呼損率から，クリーク内に接続できる最大の呼数を推定する．この推定値が呼量によらず一定であれば，このDCAをクリークパッキングで近似的にモデル化できると考える．また，逆にDCAの呼損率をクリークパッキングモデルを用いて近似計算することも可能となる．呼損率は加わる呼量によって異なる値をとるため，First-Available法の定常的な最適化の能力を表す指標としては十分とは言えない．しかし，上記のようにDCAをクリークパッキングでモデル化できれば，クリーク内に接続できる呼数を呼量によらない指標として用いることは可能である．本論文では，数値実験結果から，構造が規則的なセルラシステムにおいて，DCAをクリークパッキングでモデル化できることを明らかにする．

2. セルラシステムのモデルとクリークパッキング

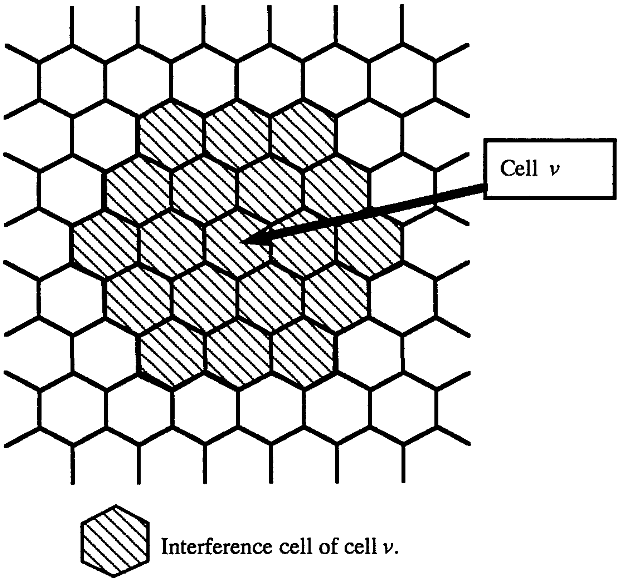
本論文で用いる用語等の定義，規則の説明を行う．セルラシステムにおいて，サービスエリア内のすべて

(注1) セルラシステムにおいて，呼を点で表し，互いに干渉セルであるようなセルに存在する呼を線で結べばグラフができる．このグラフに彩色することとチャネル割当ては同じ意味をもつ．この条件は，グラフ理論における(彩色数)－(クリーク数)≧0という関係[13]，[14]からもわかる．

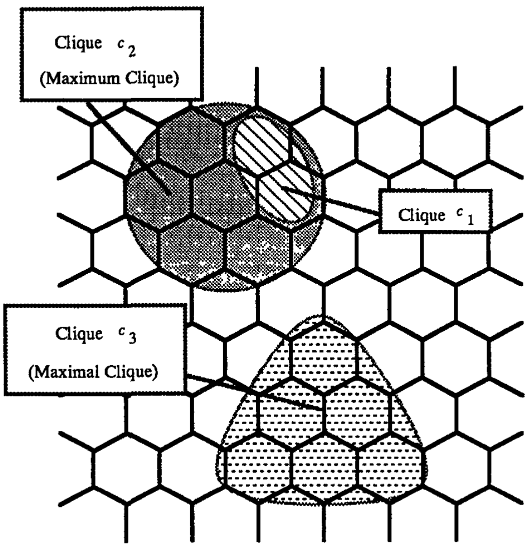
のセルの集合を V で表す．V に含まれるセル v を考える．セル v との同一チャネル間干渉が無視できないセルを，v の干渉セルと呼ぶ．v 自身も v の干渉セルであるとする．互いに干渉セルである二つのセルに対して，同一のチャネルを割り当てることはできない．互いに干渉セルでないような二つのセルに関しては，同一チャネルを同時に割り当てることが許される．これがDCAを用いるときのチャネル割当て規則となる．図1のように規則的に六角形のセルが並ぶようなセルラシステムにおいて，p セル隣りのセルまでが干渉セルになるようなシステムを p 段バッファシステムと呼ぶことにする．図1(a)は2段バッファシステムにおける干渉セルの例である．この図のように，2段バッファシステムにおいては，セル v に隣接するセルと2セル隣りのセルがセルvの干渉セルとなる．

つぎに，クリーク (Clique) を定義する．集合 V の部分集合 c において，どの相異なる二つのセルが互いに干渉セルであるとき，c を V におけるクリークと呼ぶ．図1(b)には，2段バッファシステムにおけるクリークの例を示している．例としてクリーク c_1, c_2, c_3 を示す．クリーク c_2 を構成する七つのセルの中から任意に二つのセルを選ぶと，選ばれた二つのセルは必ず互いに干渉セルとなっていることがわかる．セルラシステムでチャネル割当てを行うときには，互いに干渉セルであるような二つのセルに同一チャネルを割り当てることはできない．また，一つのセルに存在する複数の呼は互いに異なるチャネルを使用する．よって，一つのクリークに含まれる複数のセルに対して，同一チャネルが同時に割り当てられることはない．集合 $C(v)$ はセル v を含むすべてのクリークの集合を表すこととする．クリーク c に含まれるセルの数を $|c|$ で表す．

V におけるクリークの中で，最大個数のセルをもつクリークを最大クリーク (Maximum Clique) と呼ぶ．V におけるクリーク c が他のどのクリークにも真に含まれないとき，c を V における極大クリーク (Maximal Clique) と呼ぶ．最大クリークが含むセル数はすべてのクリークの中で最大であるので最大クリークを真に含むようなクリークは存在しない．よって，最大クリークも極大クリークの一つである．図1(b)の2段バッファシステムにおける最大クリークを求めると，c_2 と等しい形状のクリークが最大クリークとなる．この場合，最大クリークが含むセル数は7である．c_1 は c_2 に真に含まれるので，極大クリークではない．c_2 と c_3 は他のどのクリークにも真に含まれず，これらは極大クリークである．しかし，c_3 はセルを6個しか含まないので最大クリークではない．セル v を含むすべての最大クリークの集合を $C_M(v)$，すべての極大クリークの集合を $C'_M(v)$ と表す．最大クリークも極大クリークの一つであるから，$C_M(v) \subseteq C'_M(v)$ である．また，$C_M(v)$ が含む最大クリークの数を $|C_M(v)|$ で表し，$C'_M(v)$ が含む極大クリークの数を $|C'_M(v)|$ で表すこととする．



(a) 2段バッファシステムにおける干渉セル
(a) Interference cells in the 2-belt buffering system.



(b) 2段バッファシステムにおけるクリークの例
(b) Some cliques in the 2-belt buffering system.

図1 2段バッファシステムにおける干渉セルとクリーク
Fig. 1 Interference cells and Cliques in the 2-belt buffering system.

DCA を用いてチャネル割当てを行うことを考える．呼が生起したセルを v_a，システム内で使用できるすべてのチャネルの数を n_d と定義する．$C(v_a)$ に含まれるクリークを考えて，n_d 個の呼を既に接続しているクリークが存在する場合，生起呼は必ず損失呼となる．なぜなら，クリーク内では同一チャネルの再利用はできないからである．つまり，以下の条件 1 を満たすときには，どのような DCA を用いても生起呼にチャネルを割り当てることはできない．

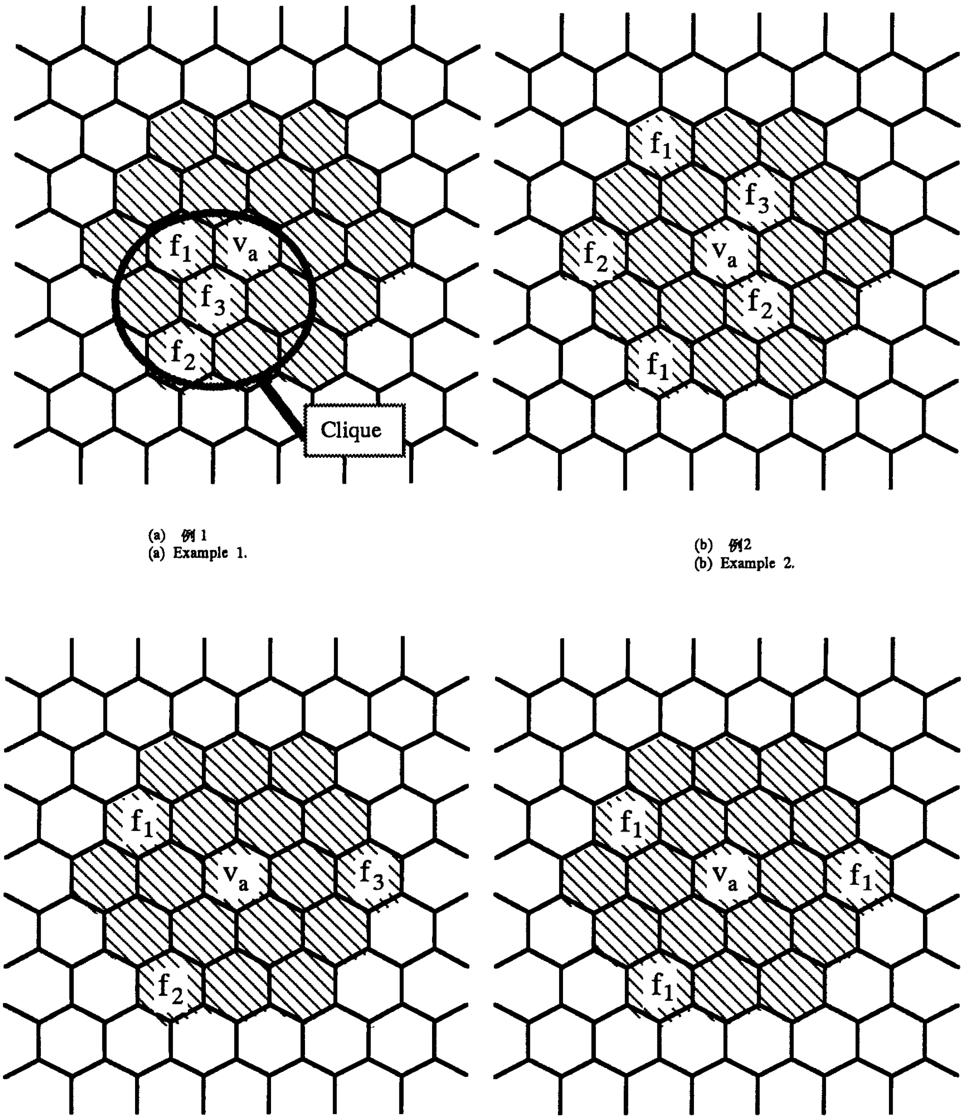
〔条件 1〕　$C(v_a)$ に含まれるクリークを考えて，下記の式(1)を満たすようなクリーク c が存在する．

$$\sum_{v \in c} nca(v) = n_d \qquad (1)$$

ここで，$nca(v)$ はセル v における呼数を表す（但し，生起呼は除く）．　□

しかし，DCA を用いて生起呼にチャネルを割り当てる場合，条件 1 を満たしていないにもかかわらず，生起呼にチャネルを割り当てられない場合がある[12]．それは，以下の場合である．

（場合 1）　条件 1 を満たしていないが，システムの干渉構造と呼の接続状況によって，生起呼が必ず損失呼となる場合．



(a) 例1
(a) Example 1.

(b) 例2
(b) Example 2.

(c) 例3
(c) Example 3.

(d) 例4
(d) Example 4.

図 2　2段バッファシステムにおけるチャネル割当て
Fig. 2　Channel assignment in the 2-belt buffering system.

（場合 2)　　条件 1 を満たしていないが，使用する DCA アルゴリズムの性能が低く，割り当てられない場合.

上記の条件 1，場合 1，場合 2 を例を使って説明する．図 2 を考える．図 2 は 2 段バッファシステムであり，三つのチャネル (f_1, f_2, f_3) を使用可能である．図のように f_1, f_2, f_3 が使用されているとする．v_a で呼が生起している．図 2(a) において，v_a を含むクリークで，三つのチャネルがすべて使用されている．この例は条件 1 を満たす場合の例である．図 2(b)〜(d) は条件 1 を満たしていない例である．しかし，図 2(b) の割当てを考えると，どのような DCA アルゴリズムを用いようとも，生起呼が必ず損失呼になる．なぜなら，この例で生起呼にチャネルを割り当てるためにはシステムに 4 チャネル必要であるからである．これが場合 1 の例である．図 2(c) において，使用中のチャネルを割当て換えできない DCA を用いるとき，生起呼にチャネルを割り当てることはできない．しかし，図 2(c) の割当てを図 2(d) のように割当て換えすると生起呼に f_2 か f_3 を割り当てることができる．よって，割り当て換えできない DCA を用いるとき，図 2(c) が場合 2 の例である．

クリークパッキングの規則を説明する．クリークパッキングにおいて生起呼が接続されるための条件を条件 2 として，以下に示す．

〔条件 2〕　$C(v_a)$ に含まれるすべてのクリーク c について，$\sum_{v\in c} nca(v) < n_d$ である．

クリークパッキングにおいては条件 1 が成り立っている場合にだけ生起呼は損失呼となる．条件 2 を満たす場合は必ず生起呼は接続される．クリークパッキングは上述の場合 1，場合 2 が起こらないと仮定した理想的なセルラシステムにおける DCA と考えられる．クリークパッキングは常に完全な最適化を行える DCA の近似的なモデルであるとも考えることができる．

ここで，極大クリークではないクリーク c_j を考える．ここで，$c_j \in C(v_a)$ であるとする．極大クリークの定義から c_j は他の極大クリークに必ず含まれる．もし，c_j がどの極大クリークにも真に含まれないならば，c_j 自身が極大クリークということになってしまうからである．また，c_j は v_a を含むので，$C'_M(v_a)$ の極大クリークに含まれるはずである．c_j に n_d 個の呼が接続されているときには c_j を含む極大クリークにも n_d 個の呼が接続されている．よって，クリークパッキングで各クリーク内の呼数を計算するときには，$C'_M(v_a)$ に含まれる極大クリーク $c_1, c_2, \cdots, c_{|C'_M(v_a)|}$ における呼数だけに注目すればよい．よって，これ以降は極大クリークだけに注目する．もちろん最大クリークの呼数にも注目する．

3. クリークパッキングのトラヒック特性の解析

常に最適な割当てを行うことができる DCA の近似的なモデルとして，クリークパッキングを考え，その解析を行う．前述のとおり，ここではクリークパッキングの呼損率を近似計算するための簡単な近似式を考案することが目的である．厳密にクリークパッキングを解析するときには，各セルの同時接続数の組合せを考慮しなければならないため，取扱いが難しくなる．しかし，クリークパッキングの呼損率を求めるときに必要とされるのは，各クリークが n_d 個の呼を接続している確率である．よって，考慮すべき組合せの数を減らすため，近似的に，セル単位の接続数を考えず，クリーク単位の同時接続数を考えることと仮定する．

クリークパッキングを用いた際のセル v_a における呼損率を B_C とする．前章で述べたように，極大クリークだけに注目する．B_C は $C'_M(v_a)$ の幾つかの極大クリークが n_d 個の呼を接続している確率である．この確率を求めるために我々は以下のような事象を考えなければならない．

事象 A_i : $c_i \in C'_M(v_a)$ であるとき，c_i において n_d 個の呼が接続されている．

このとき，B_C は

$$B_C = P\left(\bigcup_{i=1}^{n} A_i\right) = Q_1 - Q_2 + Q_3 - \cdots + (-1)^{n-1} Q_n \tag{2}$$

$$Q_m = \sum_{i_1<i_2<i_3\cdots<i_m} P(A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap A_{i_3} \cap \cdots \cap A_{i_m}) \tag{3}$$

で与えられる[15]．式 (3) の右辺の Σ は，n 個の整数 1, 2, …, n の中から相異なる整数を m 個選ぶあらゆる組合せについて加えることを意味する．ここで，$n = |C'_M(v_a)|$ である．

実際に解析を行う前に以下に示す事項を仮定する．

(1)　システムは即時式である．

(2)　呼の生起はポアソン分布に従う．

(3)　呼の保留時間は指数分布に従う．

これらの仮定は，一般に電話網のモデルとしてよく用

いられる仮定である[16]．また，一般のグラフ構造においてクリークをすべて調べることや，最大クリークを見つけることは容易ではない[13]，[14]．そこで解析を簡単に行うために更に幾つかの仮定を設ける．

（4） セルの形は正六角形であり，サービスエリアの構造は図1のように規則的である．

（5） セル数は十分大きく，サービスエリアは無限に広がっている．

（6） 干渉構造は均一であり，p 段バッファシステムである．

（7） システム内のトラヒック密度は一様であり，各セルの生起係数は λ，平均保留時間は h である．

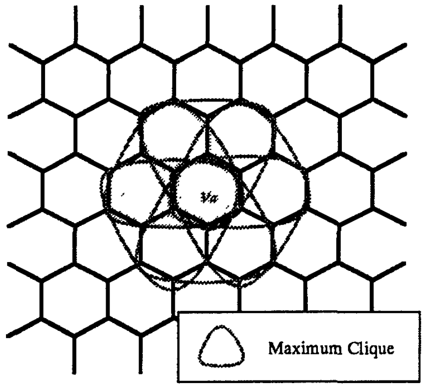
（8） ハンドオフは起こらない．

仮定（4）～（6）を設けることで，FCA におけるチャネルの繰り返し単位であるクラスタ[17]と呼ばれるセルの集まりが最大クリークとなる．図3に1段バッファシステム，2段バッファシステムにおける最大クリークを示す．図3のように，すべてのセルについて，一つのセルを含むクリークの構造は等しくなる．更に，仮定（7）からトラヒックが一様であるので，各セルの呼損率が等しくなる．また，最大クリーク c_i と最大クリークではない極大クリーク c_j を考える．最大クリーク，極大クリークの定義から，$|c_i|>|c_j|$．また，セル数は，整数であるから，$|c_i|-1\geq|c_j|$ となる．c_i における生起係数は $\lambda|c_i|$ であり，c_j においては $\lambda(|c_i|-1)$ 以下である．よって，簡単化のため，A_j が B_C に与える影響は A_i と比較して十分小さいと仮定する．すなわち，最大クリーク以外のクリークを考えないという仮定である．この仮定より，B_C を B_M として以下のように定義できる．

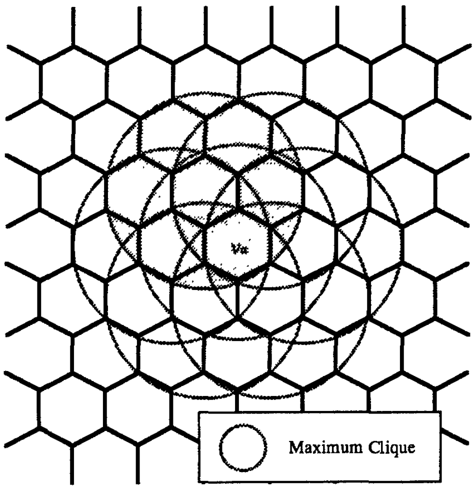
$$B_M=P\left(\bigcup_{i=1}^{n_m}A_i\right)=Q_1-Q_2+Q_3-\cdots+(-1)^{n_m-1}Q_{n_m} \tag{4}$$

ここで，$n_m=|C_M(v_a)|$ であり，A_i は $c_i\in C_M(v_a)$ であるような c_i が n_d 個の呼を接続しているという事象を表す．Q_m の定義は式（3）と同様である．図3より1段バッファシステムでは $n_m=6$，2段バッファシステムでは $n_m=7$ であることがわかる．仮定（8）は解析を簡単化するためのものである．以下，B_M を与える式を考える．

Q_m を求めることを試みる．まず，Q_1 を考える．$Q_1=\sum_{i=1}^{n_m}P(A_i)$ である．Q_1 を求めるために，$P(A_i)$ を求めることを考える．最大クリーク c_i においては，$|c_i|\lambda h$ の呼量が存在する．そのうち $|c_i|\lambda h(B_M-P(A_i))$ は c_i 以外の最大クリークにおいて失われると考え，c_i において，n_d 個のチャネルに対し，$|c_i|\lambda h(1-(B_M-P(A_i)))$ の呼量が加わっていると考える．ここで λh が小さく，B_M が小さいとき，例えば $B_M=0.01$ 程度のときには，B_M と $P(A_i)$の差は1に比べて十分小さいと考えられる．よって，$|c_i|\lambda h\{1-(B_M-P(A_i))\}\approx|c_i|\lambda h$ であると近似できる．また，逆に λh が十分大きく，$P(A_i)\approx1$ ならば，常に事象 A_i が起こっていることになるので，明らかに $B_M\approx1$ となる．よって，$B_M\approx P(A_i)$ が成り立ち，$|c_i|\lambda h\{1-(B_M-P(A_i))\}\approx|c_i|\lambda h$ と近似することができる．このようにこの近似は呼量が小さい場合，非常に大きい場合について成り立つので，ここでは，解析の簡単化のため，常に $|c_i|\lambda h\{1-(B_M$



(a) 1段バッファシステムの $C_M(v_a)$
(a) $C_M(v_a)$ in the 1-belt buffering systems.



(b) 2段バッファシステムの $C_M(v_a)$
(b) $C_M(v_a)$ in the 2-belt buffering system.

図3 最大クリーク
Fig. 3 Maximum Cliques.

$-P(A_i))\}\approx|c_i|\lambda h$ と近似できると仮定する．この近似を用いることにより，$P(A_i)$ は回線数 n_d の完全線群に $|c_i|\lambda h$ の呼量が加わったときの呼損率として計算できる．$|c_i|\lambda h$ はマルコフ性をもつので，アーラン B 式で計算が行えるということになる．不完全線群の完全線群的な部分をアーラン分布で近似する手法はよく用いられる[18]．ここでは，最大クリーク内におけるチャネルを完全線群としてモデル化していることになる．

回線数 S，加わる呼量 a のときアーラン B 式の値を $E_S(a)$ で表すと，$P(A_i)$ は，

$$P(A_i)=E_{n_d}(ka)=\frac{\dfrac{(ka)^{n_d}}{n_d!}}{\displaystyle\sum_{r=0}^{n_d}\frac{(ka)^r}{r!}} \tag{5}$$

となる．ここで，$a=\lambda h$, $k=|c_i|$, c_i は最大クリークである．$P(A_i)$ はすべての i について等しいので，Q_1 は以下のように表せる．

$$Q_1=\sum_{i=1}^{n_m}P(A_i)=|C_M(v_a)|E_{n_d}(ka) \tag{6}$$

つぎに $m>1$ であるような Q_m を求める．図 3 のように最大クリークは重なりあう．例えば，1 段バッファシステムにおいては六つ，2 段バッファシステムにおいては七つの最大クリークが重なりあう．それぞれの最大クリークは同一のセルの呼を共通に接続することになる．よって，例えば，Q_2 を計算するために必要な $P(A_i\cap A_j)$（但し，$c_i, c_j\in C_M(v_a)$）を計算するときには，二つのクリーク内の接続数は独立ではないため，互いに独立でない事象の積事象の確率として考える必要がある．前述のように，$P(A_i)$ を考えるときには c_i におけるチャネル群を完全線群によってモデル化できた．なぜなら，一つのクリーク内に接続できる最大呼数は n_d で決まっているからである．よって，Q_1 の $P(A_i)$ を計算する場合には，アーラン B 式を用いることが可能であった．同様に，本論文では，$P(A_i\cap A_j)$ を計算するときには，$c_i\cup c_j$ に接続できる呼数を近似的に一定値で定め，$P(A_i\cap A_j)$ をアーラン B 式を用いて計算することを試みる．このような $P(A_i\cap A_j)$ の計算法はあくまでも近似である．なぜなら，c_i, c_j, $c_i\cup c_j$, $c_i\cap c_j$ における呼数を n_1, n_2, n_3, n_4 とすれば，$n_3=n_1+n_2-n_4$ となり，事象 $A_i\cap A_j$ が起こっているときに，n_4 により n_3 が異なる値をとるからである．

$c_{i_1}, c_{i_2}, \cdots, c_{i_m}\in C_M(v_a)$ であるとする．$|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|$ は，$c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}$ に含まれるセル数を表すこととする．$A_{i_1}\cap A_{i_2}\cap\cdots\cap A_{i_m}$ が起こっている場合の $c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}$ における呼数を一定値で近似する．$c_{i_1}, c_{i_2}, \cdots, c_{i_m}$ はすべて最大クリークである．よって，各最大クリークが含むセル数は等しく，セル数は $|c_{i_1}|$ である．最大クリーク c におけるセル当りの呼数を，

$$\frac{(\text{最大クリーク } c \text{ における呼数})}{|c|}$$

と定義する．$A_{i_1}\cap A_{i_2}\cap\cdots\cap A_{i_m}$ が起こっている場合には，$c_{i_1}, c_{i_2}, \cdots, c_{i_m}$ のそれぞれに n_d 個の呼が接続されているから，常に各最大クリークにおいてセル当り $n_f(=n_d/|c_{i_1}|$, n_d は $|c_{i_1}|$ で割り切れるとする）個の呼が接続されていると考えることができる．最大クリークにおける呼数の最大値は n_d であるから，各最大クリークにおけるセル当りの呼数が n_f を超えることはない．更に，実際にある最大クリークが n_d 個の呼を接続していることを考える．すべてのセルが均一の生起呼量をもつことを仮定しているので，各セルに実際に接続されている呼数が極端にばらつくことは少ないと考える．そこで，最大クリークが n_d 個の呼を接続しているときには，常に各セルに n_f 個の呼を接続していると近似的に仮定する．よって，ここでは近似的に $c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}$ における呼数が $|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|n_f$ を超えることはないと仮定し，$A_{i_1}\cap A_{i_2}\cap\cdots\cap A_{i_m}$ が起こっているときには，常に $c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}$ 内に $|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|n_f$ 個の呼が接続されていると仮定する．この仮定を用いれば，$P(A_{i_1}\cap A_{i_2}\cap\cdots\cap A_{i_m})$ は回線数 $|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|n_f$ の完全線群の回線がすべて使われている確率として考えられる．また，$P(A_i)$ を考えたときと同様に，このチャネル群には，

$$|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|\lambda h\{1-(B_M-P(A_{i_1}\cup A_{i_2}\cup\cdots\cup A_{i_m}))\}$$

の呼量が加わると考えることができる．$P(A_i)$ を導いたときと同様に

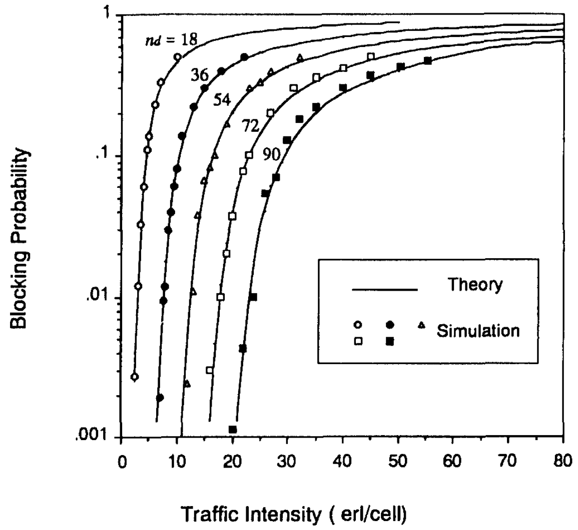
$$|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|\lambda h\{1-(B_M-P(A_{i_1}\cup A_{i_2}\cup\cdots\cup A_{i_m}))\}$$
$$\approx|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|\lambda h$$

という近似を用いれば，$P(A_{i_1}\cap A_{i_2}\cap\cdots\cap A_{i_m})$ も

$$P(A_{i_1}\cap A_{i_2}\cap\cdots\cap A_{i_m})$$
$$=E|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|n_f(|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|a) \tag{7}$$

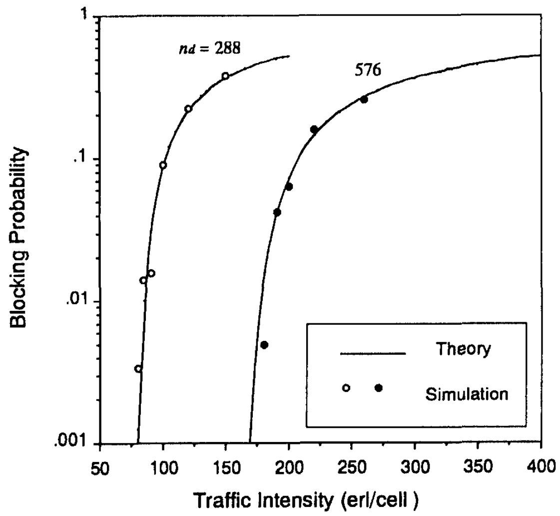
として近似的に計算できる．

m 個のクリークの組合せによって，$|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|$ はさまざまな値をとる．$k=|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|$ とすると，式(7)は k の値によって異なる値をとる．k の値によって，m 個の最大クリークの集合も区別し，Q_m を以下のように表す．



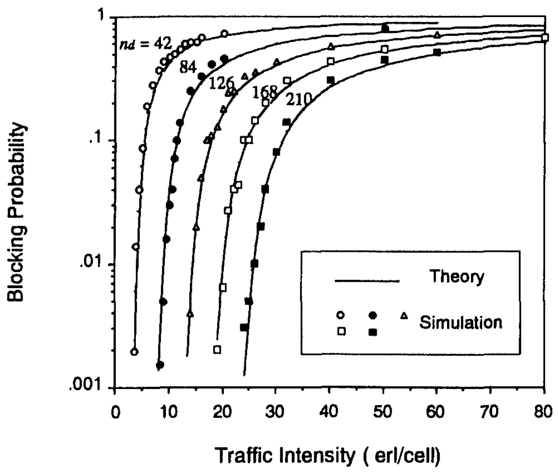
(a) 1段バッファシステムにおける呼損率

(a) Blocking probabilities in the 1-belt buffering system.



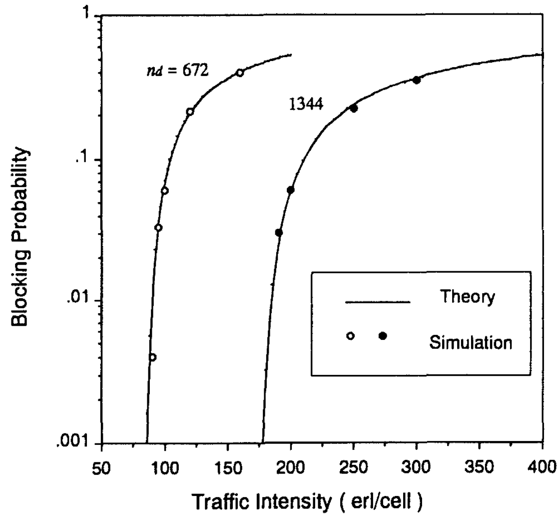
(b) 1段バッファシステムにおける呼損率

(b) Blocking probabilities in the 1-belt buffering system.



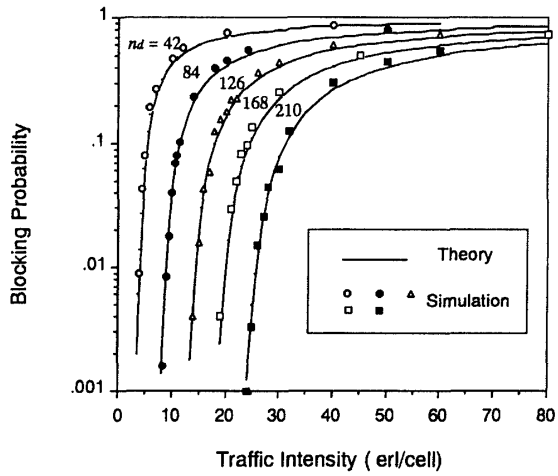
(c) 2段バッファシステムにおける呼損率．ただし，最大クリーク以外のクリークは考えない．

(c) Blocking probabilities in the 2-belt buffering system without considering cliques except maximum cliques.



(d) 2段バッファシステムにおける呼損率．ただし，最大クリーク以外のクリークは考えない．

(d) Blocking probabilities in the 2-belt buffering system without considering cliques except maximum cliques.



(e) 2段バッファシステムにおける呼損率．ただし，極大クリークを考慮する．

(e) Blocking probabilities in the 2-belt buffering system considering all maximal cliques.

図4 クリークパッキングの呼損率

Fig. 4 Blocking probabilities of Clique Packing.

$$Q_m=\sum_k t_{mk}Q'_{mk} \tag{8}$$

ここで，t_{mk} は $k=|c_{i_1}\cup c_{i_2}\cup\cdots\cup c_{i_m}|$ となるような m 個の最大クリークの組合せの数である．Q'_{mk} はそのような m 個の最大クリークのすべてが n_d 個の呼を接続している確率である．よって，式(7)から，

$$Q'_{mk}=E_{n_f k}(ka) \tag{9}$$

である．結局，式(4)，(8)，(9)から，B_M は次式のようにアーランB式の線形和として表される．

$$B_M=\sum_{k_1}t_{1k_1}E_{n_f k_1}(k_1a)-\sum_{k_2}t_{2k_2}E_{n_f k_2}(k_2a)+\cdots$$
$$\cdots+(-1)^{n_m-1}\sum_{k_{n_m}}t_{n_m k_{n_m}}E_{n_f k_{n_m}}(k_{n_m}a) \tag{10}$$

代表例として，1段バッファシステム，2段バッファシステムにおける B_M を以下に示す．1段バッファシステムにおいては，

$$\begin{aligned}B_M=&6E_{3n_f}(3a)-\{6E_{4n_f}(4a)+9E_{5n_f}(5a)\}\\&+\{6E_{5n_f}(5a)+12E_{6n_f}(6a)+2E_{7n_f}(7a)\}\\&-\{6E_{6n_f}(6a)+9E_{7n_f}(7a)\}+6E_{7n_f}(7a)\\&-E_{7n_f}(7a)\\=&6E_{3n_f}(3a)-6E_{4n_f}(4a)-3E_{5n_f}(5a)+6E_{6n_f}(6a)\\&-2E_{7n_f}(7a)\end{aligned} \tag{11}$$

となり，2段バッファシステムにおいては，

$$\begin{aligned}B_M=&7E_{7n_f}(7a)-\{12E_{10n_f}(10a)+6E_{12n_f}(12a)\\&+3E_{13n_f}(13a)\}\\&+\{6E_{12n_f}(12a)+15E_{13n_f}(13a)+12E_{15n_f}(15a)\\&+2E_{16n_f}(16a)\}\\&-\{6E_{14n_f}(14a)+12E_{15n_f}(15a)+8E_{16n_f}(16a)\\&+9E_{17n_f}(17a)\}\\&+\{6E_{16n_f}(16a)+9E_{17n_f}(17a)+6E_{18n_f}(18a)\}\\&-\{6E_{18n_f}(18a)+E_{19n_f}(19a)\}+E_{19n_f}(19a)\\=&7E_{7n_f}(7a)-12E_{10n_f}(10a)+12E_{13n_f}(13a)\\&-6E_{14n_f}(14a)\end{aligned} \tag{12}$$

となる．幾つかの項が打ち消され，1段バッファシステムの場合五つ，2段バッファシステムの場合四つの項しか残らず，非常に簡単な式で表される．

提案した式を導いた段階で近似を幾つか用いているので，電子計算機シミュレーションによる結果と比較することにより，近似式の妥当性を評価する．シミュレーションにおける仮定は以下のとおりである．

(1) システムは即時式である．

(2) 呼の生起はポアソン分布に従う．

(3) 呼の保留時間は指数分布に従う．平均保留時間は1.5分．

(4) セルの形は正六角形であり，サービスエリアの構造は図1のように規則的である．

(5) セル数は169.

(6) 干渉構造は均一である（1段バッファシステム，2段バッファシステム）．

(7) システム内のトラヒック分布は一様である．

(8) 簡単化のためにハンドオフは考えない．

境界の影響を考慮し，中心19セルの呼損率を求めた．また，2段バッファシステムにおいては，すべての極大クリークを考慮した場合と最大クリークだけを考慮した場合の両方について，シミュレーションにより呼損率を求めた．結果を図4(a)～(e)に示す．結果からもわかるように，最大クリークだけに注目した場合には近似式の値とシミュレーション値はよく一致している．この近似式の妥当性が確認できる．また，最大クリーク以外の極大クリークも考慮した場合にもよく一致している．よって，最大クリーク以外の極大クリークを無視できるという仮定の妥当性も確認できる．

4. ダイナミックチャネル割当て法とクリークパッキングの関連

再配置接続を含むDCAの最適化の能力は非常に高い[19]～[21]．再配置接続とは通話中のチャネルを割当て換えして，内部へいそくを取り除き，最適化を行う方法である．このようなDCAの呼損率特性をクリークパッキングの特性と比較する．今回用いるDCAを説明する．

(1) First-Available法[2]～[4]　First-Available法とは，番号順にチャネルを調べ，生起呼に割り当てることができるチャネルが見つかったならば，そのチャネルを割り当てるという単純なDCAである．

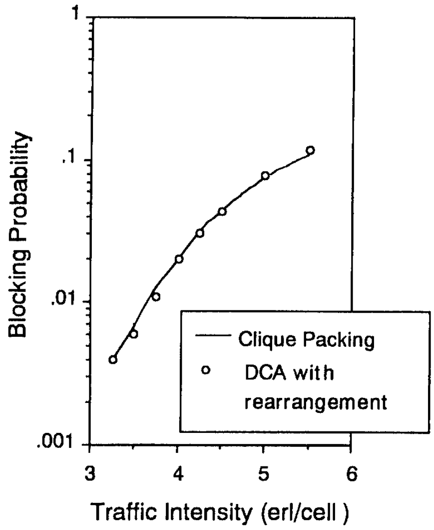
(2) 第1段階の再配置接続[19]　再配置接続の近似的なアルゴリズムであり，再配置されるチャネルの種類が1種類に限定される．

(3) ニューラルネットを用いた再配置接続[20]，[21]

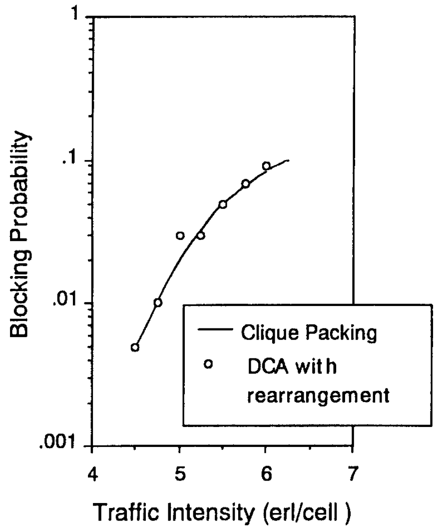
組合せ最適化問題を解くためのニューラルネットを用いて再配置接続を行う．すべてのチャネルを再配置することができる．

以上のDCAを組み合わせて用いることを考える．First-Available法で生起した呼に割り当てるチャネルを探す．チャネルが見つからない場合，第1段階の再配置接続を行う．それでもチャネルが見つからない場合，ニューラルネットを用いてすべてのチャネルの再配置接続を行う．それでもチャネルが見つからない

場合は生起呼は損失呼となる．この場合の呼損率を図5に示す．DCAの呼損率はシミュレーションで求めている．結果から，クリークパッキングと再配置接続を含むDCAの呼損率の特性はほぼ等しいと考えられる．このDCAを用いるとき，損失呼が生ずる場合に，幾つかの最大クリーク内に，n_dに非常に近い数の呼を接続していることが推測でき，最適に近い割当てが行われている（**2.** で述べた場合2がほとんど起こらない）と考えられる．また，このシステムにおいては **2.** で述べた場合1が呼損率にほとんど影響しないとも考えられる．



(a) 1段バッファシステム，21チャネル．
(a) 1-belt buffering system, 21 channels.



(b) 2段バッファシステム，49チャネル．
(b) 2-belt buffering system, 49 channels.

図5　クリークパッキングと再配置接続を行うDCAの比較
Fig. 5　Comparison between Clique Packing and DCA with rearrangement.

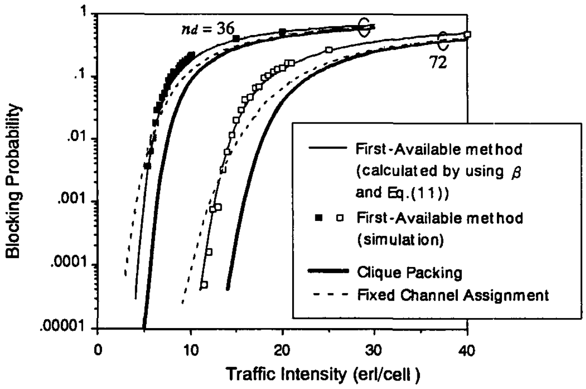
ここで，疑問となるのが必ずしも最適にチャネルを割り当てることができないDCA（例えばFirst-Available法）は最大クリーク内にどの程度の数の呼を接続できるのか，ということである．このような値が呼量によらず，それぞれのDCAについて一定値をとれば，DCAの評価を行うときに有効である．つまり，さまざまなDCAをクリークパッキングでモデル化でき，共通のモデルを用いて異なるDCAを議論できる．セル当りに加わる呼量a，シミュレーションで求めたFirst-Available法のaに対する呼損率とクリークパッキングのaに対する呼損率から考察する．チャネル数がn_dであるときのFirst-Available法のaに対する呼損率を$B(a)$で表す．B_Mの式におけるn_dをβn_dで表す．呼量a，チャネル数βn_dであるときの，クリークパッキングの呼損率を$B_M(a, \beta n_d)$で表すこととする．βは0～1であり，βn_dは整数であるとする．つぎのようなβを求める．βn_dを1～n_dまで変化させる．$\sum_a |B(a)-B_M(a, \beta n_d)|$が最小となるような$\beta n_d$を求め，これを$n_d$で割って，$\beta$を求める．$B_M$の式における$n_f$を計算するとき，$n_f=\beta n_d/|c_i|$とする（$c_i$は最大クリーク）．$B_M$の式における$kn_f$は整数になるとは限らないが，小数点以下は四捨五入して，整数として考える．このとき，丸められた分が影響を与えない程度n_dは大きいこととする．推定したβを表1，表2に示す．表1，表2から，チャネル数が異なる場合も，1段バッファシステムの場合にβは0.83程度，2段バッファシステムのときにはβは0.78程度の値をとり，それほど変化しない．また，推定したβと式(11)，式(12)を用いてチャネル数をβn_dとして求めたB_Mとチャネル数n_dのFirst-Available法のシミュレーション結果を図6に示す．呼量が異なる場合も，チャネル数が異なる場合も，両者は非常によく一致する．これらの結果から，今回対象としたセルラシステムのモデルにおいては，チャネル数が異なる場合も，呼量が異なる場合も，First-Available法におけるβがほぼ等しい数値をとることがわかる．つまり，最大クリーク内にチャネル数の約80%程度の数の呼を収容できるクリークパッキングを用いて，First-Available法をモデル化できるということである．図5から，ニューラルネットによる再配置接続を含むDCAをチャネル数n_d

表 1　1段バッファシステムにおける β
Table 1　Estimation results of β in the 1-belt buffering system.

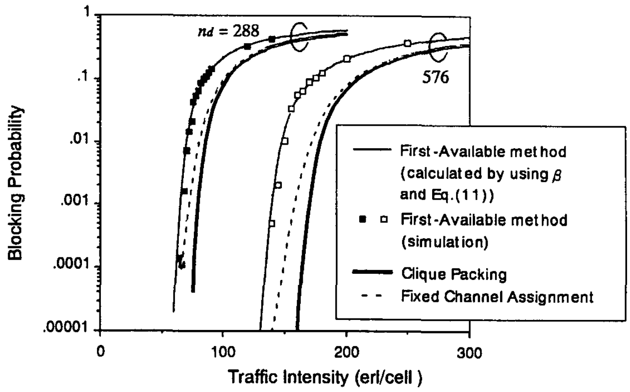
n_d	βn_d	β
36	30	0.833
72	60	0.833
288	242	0.840
576	483	0.839

表 2　2段バッファシステムにおける β
Table 2　Estimation results of β in the 2-belt buffering system.

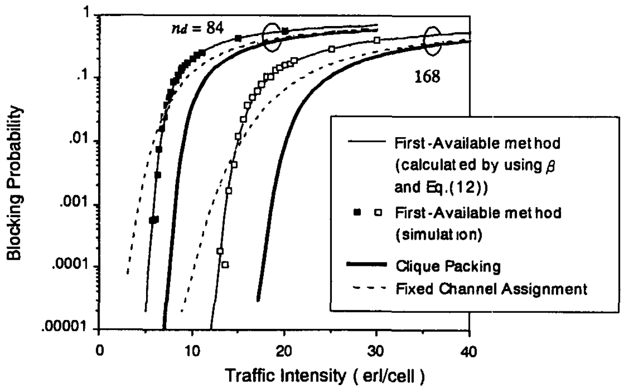
n_d	βn_d	β
42	33	0.785
84	63	0.750
168	130	0.774
672	529	0.787
1344	1056	0.786



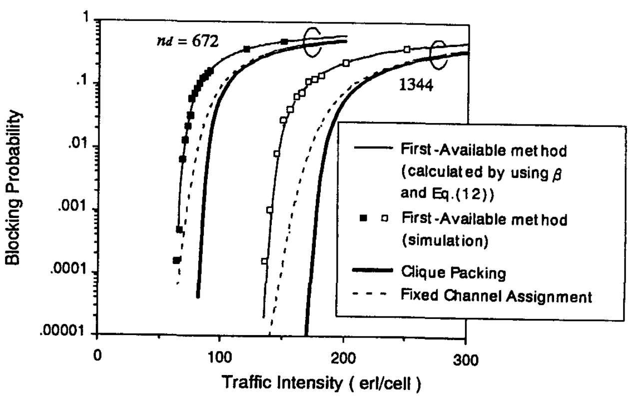
(a) 1段バッファシステムにおける呼損率（1）
(a) Blocking probabilities in the 1-belt buffering system (1).



(b) 1段バッファシステムにおける呼損率（2）
(b) Blocking probabilities in the 1-belt buffering system (2).



(c) 2段バッファシステムにおける呼損率（1）
(c) Blocking probabilities in the 2-belt buffering system (1).



(d) 2段バッファシステムにおける呼損率（2）
(d) Blocking probabilities in the 2-belt buffering system (2).

図 6　First-Available 法の呼損率の計算結果
Fig. 6　Numerical results of blocking probabilities of First-Available method.

のクリークパッキングを用いてモデル化できると考えて，最適化の度合を1とすれば，First-Available 法の最適化の度合は0.8程度であると考えることができる．また，First-Available 法をクリークパッキングでモデル化すれば，クリークパッキングの呼損率を求める近似式を用いて，チャネル数が大きい場合でも，First-Available 法の呼損率を簡単に計算できる．従来，DCA をシミュレーションで評価する場合，チャネル数が非常に大きい場合，評価に手間がかかるため，比較的，チャネル数が小さい場合の考察が多かった．今回考案した手法はチャネル数が大きい場合も，簡単に評価できると考えられるので，チャネル数が大きいシステムを想定したチャネル割当て法の開発のためにも有益である．

また，今回検討した First-Available 法以外の DCA についての検討は今後の課題であるが，Ring 法，1-Clique 法等の Call-by-Call 型 DCA [2]～[4] の呼損特性を表す曲線の形状は，First-Available 法の呼損率の曲線形状と非常に似ていることは過去の文献[22]，ほかからわかる．よって，First-Available 法と同様にクリークパッキングでモデル化できるであろうと考える．

図6において，First-Available 法と FCA の特性が逆転する反転現象[4]が生じている．今回提案した近似式と FCA の呼損率の式(アーラン B 式)からなる方程式の数値解析を行えば，反転現象が起こる場合の呼量も比較的簡単に計算できると考える．また，今回の結果から，反転現象もつぎのように簡単に説明できる．FCA では最大クリーク当り n_d 個のチャネルがあるが，一つのセルでは n_f 個の呼だけしか接続できないので，分割損が生ずる．First-Available 法は最大 $0.8n_d$ 程度までしか最大クリーク内に呼を接続できないが，FCA のように分割損は生じない．よって，呼量が小さいときには First-Available 法の方が呼損率が低くなる可能性がある．しかし，呼量が大きくなれば FCA も最大クリーク内にほぼ n_d 個の呼を接続できる（セル当りの同時接続数が n_f に近づくため）のに対し，First-Available 法では $0.8n_d$ 程度までしか最大クリーク内に呼を接続できないので反転現象が起こると考えられる．

また図6からわかるように，チャネル数が1,000程度のかなり大きい場合，First-Available 法と FCA の呼損率の反転現象が呼損率の非常に低いところで起きている．一方，クリークパッキングは呼量が小さいとき，FCA よりも呼損率がかなり低く，呼量が大きいときでも，FCA と同程度である．図5に示したように，再配置接続を含む DCA はクリークパッキングと非常に近い特性をもつ．よって，チャネル数が大きい場合においても，DCA が FCA 以上のチャネル利用効率を実現するためには，再配置接続を行うことが有効であることがわかる．

5. むすび

最適な割当てを行う DCA のモデルであるクリークパッキングの呼損率の近似式を与えた．この近似式は一般によく使われる六角形セルからなる2次元サービスエリアにおける呼損率を与えている．数値実験との比較により，チャネル数1,000程度まで評価を行い，1段バッファシステム，2段バッファシステムにおける近似式の妥当性を確認した．この近似式は，導く際に，かなりラフな近似がなされているが，広く知られているアーラン B 式を用いて計算が行えるという利点がある．式が比較的簡単な形をしていること，簡単に計算できること，数値実験結果とかなり一致することから有効な手法であると考える．また，チャネル数が大きくなっても，シミュレーションほど計算に時間もかからない．よって，大規模システムの評価をする際には有効な手法であると考える．また，一例ではあるが，再配置接続を含む DCA の特性を示し，これがクリークパッキングに非常に近くなることを確認した．

また，必ずしも最適ではない DCA の代表例として，使用できるチャネル数が n_d であるとき，First-Available 法を考え，これをクリークパッキングでモデル化し，最大クリーク内にどの程度のクリークを収容できるかを数値実験結果をもとに算出した．使用できるチャネル数が n_d であるとき，First-Available 法が最大クリーク内に収容できる呼数を βn_d としたときに，1段バッファシステムにおいて β は0.83程度，2段バッファシステムにおいて β は0.78程度になることを確認した．数値実験結果によって示したように，β は呼損率のように呼量によって変化することもなく，DCA 自身の能力を評価する際のパラメータとして有効である．また，チャネル数を βn_d とした場合のクリークパッキングの呼損率の近似式を用いて，First-Available 法のような DCA の呼損率の計算，FCA と DCA の反転現象が起こる際の呼損率の算出を簡単に行える．さまざまな DCA について β が決まり，クリークパッキングでモデル化できれば，統一的な扱いをすることが

できる．

今後の課題として，空間的に呼量が不均一なセルラシステムにおけるクリークパッキングの特性，DCA のモデルとしての有効性，First-Available 法がクリーク内に収容できる呼数とチャネル数の比が常に一定になるかどうかを理論的に解析すること等を検討することが残されている．また，First-Available 法以外の DCA，1 段，2 段バッファシステム以外のシステムについても検討することも今後の課題である．

謝辞 貴重な御意見を頂いた新潟工業短期大学渡部清一教授，日本精機(株)嶋田一彦氏，新潟大学大学院生中沢洋司氏に対し感謝の意を表する．

文　献

[1] W. C. Y. Lee, Mobile Cellular Telecommunications Systems, McGraw-Hill, 1989.

[2] 仙石正和, "自動車電話の周波数有効利用-チャネルの割当アルゴリズム-," 信学誌, vol. 69, no. 4, pp. 350-356, Apr. 1986.

[3] M. Yokoyama, "Decentralization and distribution in network control of mobile radio communications," Trans. IEICE, vol. E73, no. 10, pp. 1579-1586, Oct. 1990.

[4] K. Okada, and F. Kubota, "On dynamic channel assignment strategies in cellular mobile radio systems," Trans. IEICE, vol. E75-A, no. 12, pp. 1634-1641, Dec. 1992.

[5] 大塚　晃, 仙石正和, 山口芳雄, 阿部武雄, "移動体の流れと移動通信トラヒックに関する基礎研究", 信学技報, CAS86-249, pp. 81-88, Mar. 1987.

[6] M. Sengoku, "Telephone traffic in a mobile communication system using dynamic frequency assignments," IEEE Trans. Veh. Tech., vol. VT-29, no. 2, pp. 270-278, May. 1980.

[7] L. Schiff, "Traffic capacity of three types of common-user mobile radio communication systems," IEEE Trans. Commun., vol. COM-18, no. 1, pp. 12-21, Feb. 1970.

[8] D. E. Everitt, and N. W. Macfadyen, "Analysis of multicellular mobile radio telephone systems with loss," Brit.Telecommun.Technol.J., vol. 1, no. 2, pp. 37-45, Oct. 1983.

[9] D. E. Everitt, and D. Manfield, "Performance analysis of cellular mobile communication systems with dynamic channel assignment," IEEE Select. Areas Commun., vol. 7, pp. 1172-1180, Oct. 1989.

[10] F. P. Kelly "Blocking probabilities in large circuit-switched networks," Adv.Appl.Prob., vol. 18, pp. 473-505, 1986.

[11] S. Jordan, and A. Khan, "A performance bound on dynamic channel allocation in cellular systems : equal load," IEEE Trans. Veh. Tech., vol. VT-43, no. 2, pp. 333-344, May. 1994.

[12] P. Raymond, "Performance analysis of cellular networks," IEEE Trans. Commun. vol. 39, no. 12, pp. 1787-1793, Dec. 1991.

[13] ベザット，チャートランド，ホスター，グラフとダイグラフの理論，共立出版, 1981.

[14] 伊理正夫他, 演習グラフ理論, コロナ社, 1983.

[15] 高島巳千雄, 序説確率・統計, 東京数学社, 1977.

[16] D. Bear, "Principles of telecommunication-traffic engineering," IEE, 1976.

[17] V. H. MacDonald, "The cellular concept," Bell Syst. Tech. J., vol. 58, no. 1, pp. 15-41, Jan.1979

[18] 五嶋一彦, "時分割 T-S-T 通話路網における接続換えの諸性質," 信学論, vol. J61-B, no. 3, pp. 182-188, Mar. 1978.

[19] 仙石正和, 倉田盛彦, 梶谷洋司, "移動通信系への再配置接続の適用," 信学論, vol. J64-B, no. 9, pp. 978-985, Sep. 1981.

[20] 仙石正和, 中野敬介, 篠田庄司, 山口芳雄, 阿部武雄, "セルラ移動通信系のチャネル割当て問題とニューラルネットの応用," 信学論, vol. J74-B-I,no. 3, pp. 190-200, Mar. 1991.

[21] K. Nakano, M. Sengoku, S. Shinoda, Y. Yamaguchi, and T. Abe, "Channel assignment in cellular mobile communication systems using neural networks," ICCS'90, pp. 1451-1454, Nov. 1990.

[22] M. Sengoku K. Itoh, and T. Matsumoto, ."A dynamic frequency assignment algorithm in mobile radio communication systems," Trans.IECE, vol. E61, no. 7, pp. 527-533, July. 1978.

[23] K. Nakano, M. Sengoku, S. Shinoda, Y. Yamaguchi, and T. Abe, "On the blocking probability of dynamic channel assignment in cellular mobile communication systems," Proc. JTC-CSCC'92, pp. 381-386, 1992.

(平成 7 年 4 月 4 日受付，7 年 7 月 3 日再受付)

中野　敬介　(正員)

平元新潟大・工・情報卒．平 3 同大大学院修士課程了．平 6 同大大学院博士課程了．現在，新潟工業短大・生産システム工学科．移動通信ネットワークの研究に従事．博士(工学)．

仙石　正和　(正員)

昭 42 新潟大・工・電気卒．昭 47 北大大学院博士課程了．同年北大・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 年度本会論文賞受賞．著書「演習グラフ理論」(共著)．情報処理学会，IEEE 各会員．

篠田　庄司　（正員）

昭39中大・理工・電気卒．昭48同大大学院博士課程了．昭40中大研究助手．現在，同大理工学部・電気電子教授．グラフ・ネットワーク構造を持つシステムの解析，設計，制御の研究に従事．工博．平3年度本会論文賞受賞．著書「最新回路理論」，「回路解析」，「演習グラフ理論」他．IEEE会員．

阿部　武雄　（正員）

昭24東工大・工・電気卒．電気試験所，千葉工大，東工大工業教員養成所を経て，昭41新潟大・工・教授．平3千葉工大教授．現在，新潟工科大学学長．高周波標準レーザ光の降雪中の伝搬，マイクロ波素子，損失媒質中の伝搬，および移動通信，ネットワークなどの研究に従事．工博．平3年度本会論文賞受賞．著書「電気・電子計測」(共著)等．日本雪氷学会，日本雪工学会，IEEE各会員．