

電力用移動無線システムの最適化

(財) 電力中央研究所 情報研究所 所 健一, 松井 正一
九州電力(株) 西野 能啓, 橋口 英夫

1 はじめに

電力会社では独自の移動無線システムを構築・運用し、これを障害の復旧作業をはじめ、安定して電力を供給するために利用している。たとえば電力供給に障害が発生した場合、いち早くこれを修復し、電力の供給を再開するうえで、電力用移動無線が非常に重要な役割を果たす。感電などの事故を防ぎつつ復旧作業を進めるには、電力用移動無線を用いて密接な連絡を行いつつ、作業の進行に合わせて順次電力の供給を再開していく必要がある。

現在電力会社では電力用移動無線システムのデジタル方式への移行を検討しているが、この中で各基地局で必要となるチャンネル数の算定方法と、各基地局への周波数の割当方法が重要な課題となっている。近年の移動無線の急速な普及により、周波数がますます貴重な資源となるのにもない、電力用移動無線システムにも、利用する周波数の帯域幅を最小化することが強く求められている。このため各基地局で必要となるチャンネル数の算定根拠を明らかにするとともに、利用周波数の帯域幅が最小となるように、各基地局に対し最適に周波数を割り当てる必要がある。

一般的な必要チャンネル数の算定には、アールンB式が用いられることが多い。しかし、限定された数の移動局でのチャンネル共用や、チャンネルの運用方法などを考えると、電力用移動無線における必要チャンネル数の算定に、アールンB式を適用するには問題がある。必要チャンネル数の根拠とするには、より適切な算定方法が求められる。そこで、移動無線の利用がピークとなる台風などによる障害の復旧作業時を対象に、規定時間内に復旧可能な箇所数の観点から必要チャンネル数を算定することを検討した。復旧作業時に利用可能なチャンネル数により、通信待ち時間が変化することから、一障害箇所を復旧するのに要する時間も変化する。結果

として規定時間内に復旧可能な箇所数も、利用可能なチャンネル数の影響を受ける。そこで、ここでは規定時間内に想定される障害箇所数の復旧を完了でき、また通話待ち時間が許容値以下となるチャンネル数を必要チャンネル数と定義し、この必要チャンネル数を算定する方法を検討した。そして、復旧作業における作業班の作業状態の推移を閉鎖型待ち行列網でモデル化し、この待ち行列網の解析から復旧可能箇所数と通話待ち時間の推定を行った。

また周波数を効率的に利用するには、お互いに電波が干渉しない複数の基地局で同一の周波数が有効に再利用されるように、基地局に周波数を適切に割り当てるのが重要となる。こうした周波数の最適割当てに関しては、これまでも多くの研究が行われており、様々な割当手法が提案されている。このうち数理計画法を用いた手法 [1] は、大域的最適解を求めるという観点では優れているものの、これを実際の電力用移動無線の周波数割当てに適用するには、計算時間などの面で問題がある。また、ニューラルネットワーク [2, 3, 4] や遺伝的アルゴリズム (GA) [3, 6, 5, 7, 9, 8] を用いた手法については、計算時間の面では優れているものの、より単純な問題に対しても、大域的最適解へと収束しないことが多いという問題がある。そこで、ここでは基地局への最適な周波数割当てをを求める手法として、貪欲アルゴリズムと GA の組合せによる新たな割当手法を提案した。提案割当手法では、利用可能な周波数のうち、チャンネル番号が最小なものから割当てを行う貪欲アルゴリズムを基本に、GAにより最適な基地局への割当て順序を探索する。グラフ理論より得られる情報を基に、周波数を割り当てていく基地局に優先順位を付けたうえで提案手法を適用したところ、利用周波数の帯域幅が最小となる割当てが、非常に短い計算時間で求められ、周波数割当て作業の大幅な効率化が実現された。

2 必要チャンネル数の算定

本節では、まずは電力用移動無線のチャンネル数算定へのアーランB式適用の問題点について述べ、次に復旧作業の概略と、このモデル化について説明する。そして最後に閉鎖型待ち行列網による復旧可能箇所数の算定方法について説明する。

2.1 アーランB式適用の問題

アーランB式を用いて電力用移動無線の必要チャンネル数を算定するには、以下の問題がある。

2.1.1 有限呼源

アーランB式の導出においては無限呼源を仮定し、呼の到着が話中の呼数には依存せず常に一定であるものとする。しかし、電力用移動無線においては、同一チャンネルを共用する移動局数は数十であり、話中や通話待ちの移動局が増えれば、新たな呼の到着は少なくなると考えるのが自然である。

2.1.2 話中検知

電力用移動無線では、他の移動局の通話を傍受できるので、他の移動局によりチャンネルが利用されていた場合には、この移動局の通話終了を待ち、終了と同時に通話を開始することができる。したがって、電力用移動無線のチャンネル数の算定にあたっては、アーランB式のような即時式ではなく、呼がチャンネル空きを待ち、チャンネル空きと同時に通話を開始できるとした待時式で評価するのが適当である。

2.1.3 優先処理

アーランB式の導出では、すべての呼は同一に扱われ、呼の処理に優先順位は無い。しかし、電力用移動無線においては、後述するように通信待ち時間に対する要求の異なる複数の通話が存在する。それぞれを別クラスの呼と考え、クラスの違いによる優先処理を行うことで、より効率的にチャンネルが利用できる可能性がある。

2.2 復旧作業

ここでは復旧作業をモデル化し、このモデル化された復旧作業における修復可能箇所数を推定し、これから必要チャンネル数を算定した。

2.2.1 復旧作業のフロー

復旧作業は個々の作業班による、図1に示す一連の作業の繰り返しにより行われる。復旧作業にあたる作業班は障害発生箇所へと移動し、そこで障害箇所の修復作業を行う。修復作業の完了後は開閉器操作作業へと移り、修復箇所への通電を再開し、最終的な通電の確認後、次の障害発生箇所へと移動する。

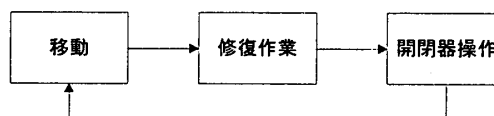


図1: 復旧作業のフロー

この修復作業と開閉器操作作業を進めるには、それぞれ表1と表2に示す移動無線を用いた通話が必要となる。

表1: 修復作業における通話

作業開始連絡	作業班より責任者へ、修復作業への着手を連絡
作業状況報告	予定より復旧作業に時間を要する場合等、必用に応じて状況を作業班から責任者へ報告
終了予定時刻報告	復旧作業の終了見込み時刻を作業班から責任者へ報告
作業終了時刻報告	復旧作業の終了時刻を作業班から責任者へ報告
移動報告	次の復旧作業箇所への移動を作業班から責任者へ報告
その他指示	復旧作業スケジュールが当初予定から変更となった場合等、責任者が作業班へ指示

なお、これらの復旧作業における通話のうち、修復作業に関わる通話については、ある程度の通信待ち時間が許容できるが、感電事故防止などの安全面に直接

表 2: 開閉器操作作業における通話

予定時刻報告	復旧作業完了後の開閉器操作予定時刻を作業班から責任者へ報告
人員掌握指令・結果報告	責任者から作業班への、感電事故防止のための充電部付近における作業員等の確認指令と、それに対する作業班から責任者への報告
ショートアース取り外し指令・報告	責任者から作業班への開閉器操作前のアース取り外し指令と、作業班から責任者への作業結果の報告
開閉器操作開始指令・報告	責任者から作業班への開閉器操作開始の指令と、作業班から責任者への操作完了の報告
点灯状況確認結果報告	責任者から作業班への、最終的な通電状況を確認するための点検状況確認指令と、これに対する作業班から責任者への報告

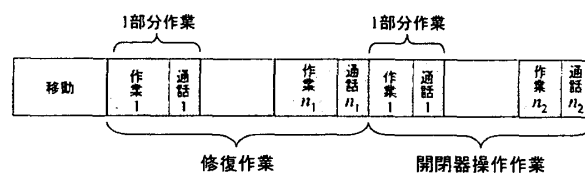


図 2: 部分作業のイメージ

に対する要求の厳しい開閉器操作作業に関する通話に割り込み優先権を与えるものとする。これにより、チャンネルは開閉器操作作業に関する通話から優先して割り当てられる。また、すべてのチャンネルが利用中であっても、修復作業に関する通話がチャンネルを利用していた場合には、これを一時中断し、即座に開閉器操作作業に関する通話を開始する。

関わる開閉器操作に関わる通話については、通信待ち時間に対する要求が厳しい

2.2.2 復旧作業のモデル化

前述の復旧作業を以下のようにモデル化したうえで、各基地局で必要となるチャンネル数の算定を行った。

(a) 部分作業への分割

復旧作業中に行われる通話に着目し、修復作業と開閉器操作作業を、それぞれ1回の通話を区切りとする部分作業に分割する。分割にあたっては、修復作業と開閉器操作作業の中で行われる通話が、それぞれの実作業時間内に一様に分布するものと仮定する。修復作業に要する(通話時間を除く)実作業時間を x 分、開閉器操作作業に要する実作業時間を y 分とし、修復作業中に n_1 回、開閉器操作作業中に n_2 回の通話が行われるとすると、図2のように、修復作業が x/n_1 分の実作業と1通話を一つの単位とする n_1 個の部分作業から構成され、同様に開閉器操作作業は y/n_2 分の実作業と1通話を一つの単位とする n_2 個の部分作業から構成されるものとする。

(b) チャンネルの運用方式

修復作業と開閉器操作作業における通信待ち時間に対する要求の違いを考慮したうえで、利用可能なチャンネルを最大限に有効活用することを考え、通信待ち時間

2.3 復旧可能箇所数からのチャンネル数算定

復旧作業における作業班の作業状態の推移を閉鎖型の待ち行列網でモデル化し、この待ち行列網の解析により、規定時間内の復旧可能箇所数と通信待ち時間を推定し、これから必要チャンネル数を算定した。

2.3.1 閉鎖型待ち行列網によるモデル化

図3の閉鎖型待ち行列網により、復旧作業における作業班の作業状態の推移をモデル化する(各ノードの詳細は表3のとおり)。

この閉鎖型待ち行列網では作業班(客)が優先度クラスを変化させながら、復旧作業における「移動」、「修復作業」、「開閉器操作作業」、移動無線を用いた「通話」をそれぞれモデル化したそれぞれのノードを巡回する。ここでは修復作業を行っている作業班に相当する客の優先度をクラス2、開閉器操作作業を行っている作業班に相当する客の優先度をクラス1とし、ノード3におけるクラス1の客に対して、割り込み優先権を与える。

実際の復旧作業では n_1 回の修復作業の部分作業を完了した後、作業班は開閉器操作作業へ進み、次に n_2 回の開閉器操作作業の部分作業を完了した後に、次の障害箇所へと移動を行うが、ここではこれらの作業状態の推移を確率的に扱い、各ノードでのサービスが終了した客の推移確率を表4のようにした。

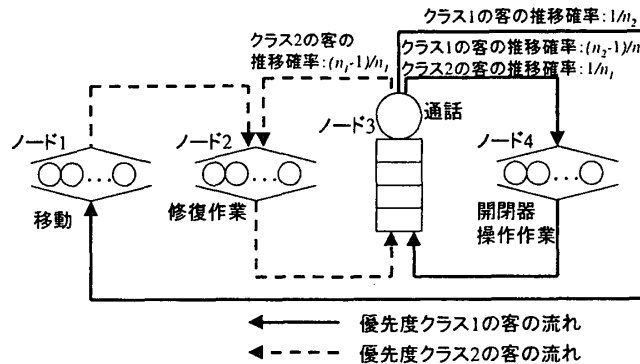


図 3: 閉鎖型待ち行列網による復旧作業フローのモデル化

表 3: ノードの定義

ノード	モデル化する作業	待ち行列のタイプ	平均サービス時間
1	移動	ディレイサーバ	平均移動時間
2	修復作業の部分作業	ディレイサーバ	修復作業の1部分作業時間 (通話時間を除く)
3	通話	m 個の窓口を持つ待ち行列	平均通話時間
4	開閉器操作の部分作業	ディレイサーバ	開閉器操作作業での1部分作業時間 (通話時間を除く)

表 4: サービスが終了した客の推移確率

ノード	推移先
1	優先度クラスを2に変えてノード2へ
2	ノード3へ
3	クラス1の客: 確率 $(n_2 - 1)/n_2$ でノード4へ, 確率 $1/n_2$ でノード1へ クラス2の客: 確率 $(n_1 - 1)/n_1$ でノード2へ, 確率 $1/n_1$ で優先度クラスを1に変えてノード4へ
4	ノード3へ

2.3.2 待ち行列網の解析と必要チャネル数の算定

ここでは待ち行列網の定常状態の存在を仮定し、各ノードの客数を状態とするマルコフ連鎖の平衡方程式を解くことで、各ノードの平均客数を求めた。そして、この平均客数から、クラス1の客に割り込まれることによるクラス2の客の待ち時間の増加も考慮したうえで、クラス1, 2の客それぞれのノード3での平均待ち時間を計算し [10, 11], これより修復作業と開閉器操作作業における通話の平均待ち時間を推定した。

また、この待ち行列で客が網を循環する平均時間 (ノ

ード1を出た客が、再びノード1に戻ってくるまでの平均時間) は、作業班が一障害箇所の復旧作業を終了するのに要する平均時間に相当する。したがって、規定時間をこの平均循環時間で除算し、これに作業班の総数を乗じることで、図4に示すように復旧作業にあたる作業班全体で、規定時間に何箇所の復旧作業が完了できるかが推定できる。これより規定時間内に想定される障害箇所数の復旧が行え、通話待ち時間が規定値以下となるチャネル数を見つけることで、必要チャネル数の算定が可能となる。

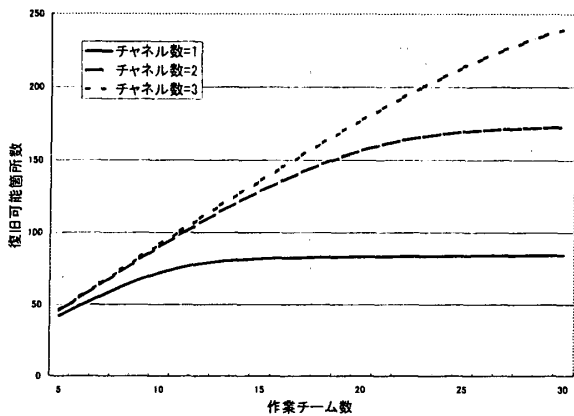


図 4: 復旧可能箇所数の推定結果

3 周波数の最適割当て

各基地局の必要チャンネル数が与えられた条件で、利用周波数の帯域幅が最小となる、各基地局への周波数割当てを求める手法について検討した。

3.1 定式化

電力用移動無線基地局への周波数割当て問題は以下に示すように定式化される。なお、代表的な移動無線基地局へのチャンネル割当て方式には、固定チャンネル割当て法 (FCA: Fixed Channel Allocation), 動的チャンネル割当て法 (DCA: Dynamic Channel Allocation), さらにその混合であるハイブリッド割当て法 (HCA: Hybrid Channel Allocation) の三つがあるが、ここでは電力用移動無線システムにおいて採用されている、FCA 方式によるチャンネル割当てを対象とする。FCA 方式とは、各基地局に対してあらかじめチャンネルを割り当てておき、その基地局のエリア内で生じた呼には、その基地局に割り当てられたチャンネルの中から一つを選んで割り当てる方式である。

3.1.1 前提条件

以下のデータが与えられるものとする。

1. 要求チャンネル数: 各基地局で必要となるチャンネル数が与えられるものとする。以降、基地局 i で必要なチャンネル数を r_i と記述する。なお、一台の送信機には最大二つのチャンネルが割当て可能であり、

基地局には要求チャンネル数に合わせた台数の送信機が設置されるものとする。つまり基地局 i には $\lceil r_i/2 \rceil$ 台の送信機が設置されることになる。ここで $\lceil x \rceil$ は x 以上の最小の整数を表す。

2. 基地局の干渉条件: すべての基地局の組に対して、信号対干渉電力比 (CIR) の値から、同一のチャンネルが利用可能かどうか与えられるとする。基地局 i と j で同一のチャンネルが利用可能なら $p_{ij} = 1$, 利用不可能なら $p_{ij} = 0$ とする。

3.1.2 目的関数

以下で定義する全基地局での利用周波数の帯域幅最小化と、干渉地域に位置する基地局での利用周波数の帯域幅最小化を目的に、基地局に周波数を割り当てる (図 5)。なお、ここでは利用する周波数のうち、チャ

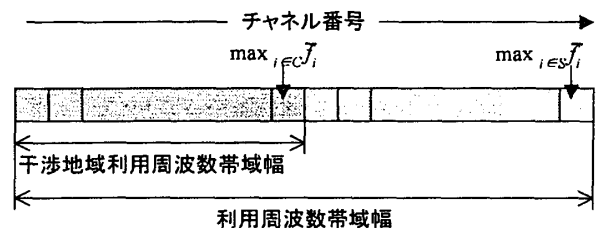


図 5: 周波数割当て問題の目的関数

ネル番号最大のものと、最小のものとの差を帯域幅と定義する。

1. 利用周波数帯域幅の最小化: 全基地局で使用する周波数の帯域幅を最小化する。 S を全基地局の集合、 \bar{f}_i を基地局 i に割り当てられたチャンネル番号最大の周波数とすると、 $\max_{i \in S} \bar{f}_i$ が最小となるように周波数を割り当てる。
2. 干渉地域利用周波数帯域幅の最小化: 全電力大での周波数利用の効率化を考え、他電力会社の基地局との干渉地域に位置する基地局で使用する周波数の帯域幅を最小化する。 $C \subset S$ を干渉地域に設置される基地局の集合とすると、 $\max_{i \in C} \bar{f}_i$ が最小となるように周波数を割り当てる。

3.1.3 制約

以下の三つの制約条件が満たされるように周波数を割り当てる。

1. 同一チャンネル割当条件：信号対干渉電力比 (CIR) が許容値を越える基地局の組には、同一の周波数を割り当てない。つまり $p_{ij} = 0$ となる局 i, j に対しては、同一のチャンネルを割り当てない。
2. 同一局でのチャンネル間隔条件：同一の基地局に割り当てるチャンネルには、1チャンネル以上の間隔を設ける。局 i に割り当てられる任意の二つのチャンネルを f_i^k, f_i^l とすると、条件 $|f_i^k - f_i^l| \geq 2$ を満たすようにチャンネルを割り当てる。
3. 同一送信機でのチャンネル間隔条件：同一の送信機に割り当てられるチャンネルは、間隔が7チャンネル以下となるようにする。局 i に設置される一台の送信機に割り当てられる二つのチャンネルを f_i^k, f_i^l とすると、条件 $|f_i^k - f_i^l| \leq 8$ を満たすようにチャンネルを割り当てる。

3.2 必要帯域幅の下界値

以下に示すようにして作ったグラフ G の最大クリークの位数は、基地局へ周波数を割り当てるのに必要となる帯域幅の下界値となる。

1. すべての基地局を対象に、一つの局を1頂点とし、 $p_{ij} = 0$ となる局同士を直接辺で結んだグラフを作る (図6 (b))。
2. 各頂点を $r_i - 1$ 個複製する。この時、他の頂点との辺も同時に複製する (図6 (c))。
3. 同じ局に相当する頂点同士を辺で結ぶ (図6 (d))。

同一チャンネル割当て条件を満たすためには、このグラフ G で直接辺で結ばれた頂点は異なる色を塗るという条件の下で、頂点を塗り分けるのに必要な色数が相当する帯域幅が最低でも必要となる。そして、グラフ G の頂点を塗り分けるには、最低でもこのグラフの最大クリークの位数の色数が必要となる。図6の最大クリーク (図6 (d) の円で囲った部分グラフ) の位数は4であるから、この例での周波数割当てには最低4チャンネル分の帯域が必要となる。なお、最大クリーク

により求まるのは、あくまで必要となる帯域幅の下界値である。グラフ G の作成には、制約条件のうちのチャンネル間隔条件は考慮していないため、実際にはこれ以上のチャンネル数が必要となることもある。

最大クリークを求めること自体 NP 完全な問題となるが、最大クリークを効率的に求める手法が提案されており [12]、周波数割当てに関するグラフについては、比較的容易に最大クリークを求めることができる。そこで、ここではこの手法を用いて管内全体の基地局を対象としたグラフの最大クリークと、干渉地域に属する基地局のみを対象としたグラフの最大クリークを求め、これを GA による探索の効率化や、得られた割当ての最適性の評価に利用した。

3.3 提案する割当手法

提案手法では貪欲アルゴリズムと GA [13, 14] の組み合わせにより、二つの利用周波数の帯域幅が最小となる基地局への最適な周波数割当てを探索する。以下では、まず貪欲アルゴリズムについて説明し、次に GA による割当順序の探索について述べる。なお、こうした GA をメタヒューリスティックとして利用する方法と、単純な GA との性能比較については文献 [15] を、タブーサーチとの性能比較については文献 [16] を参照されたい。

3.3.1 貪欲アルゴリズム

利用帯域幅がなるべく小さくなるように、送信機に周波数を割り当てる方法の一つに、割当て可能な周波数のうち、チャンネル番号最小のものから順次割当てを行う、以下の貪欲アルゴリズムが考えられる。

貪欲アルゴリズム

1. 周波数の探索：送信機 k に割当て可能な周波数を見つける。
 - (a) k に割り当てられるチャンネル数が1の時： k に割当て可能なチャンネル番号最小の周波数 f_1 を見つける。
 - (b) k に割り当てられるチャンネル数が2の時：チャンネル間隔条件 $2 \leq f_2 - f_1 \leq 8$ を満たす、 k に割当て可能な周波数 f_2 ($f_2 > f_1$) が存在する、 k に割当て可能なチャンネル番号最小の周波数 f_1 を見つける。

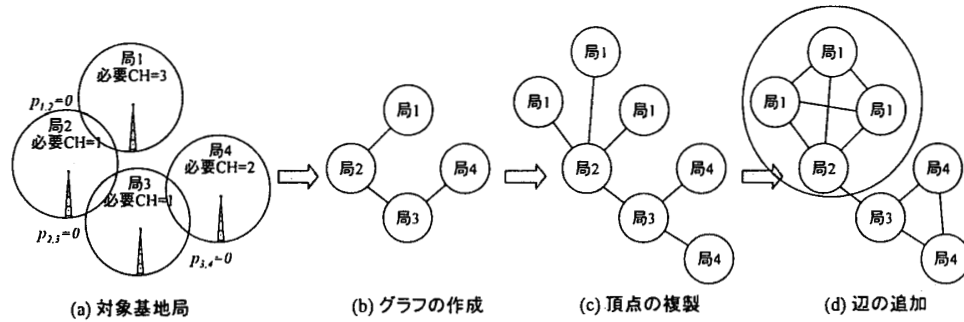


図 6: 彩色問題としての定式化

2. 局への割当て：(1) で見つけた周波数を送信機 k に割り当てる。そして送信機 k が設置される基地局 i に対して、 $p_{ij} = 0$ となる局 j においては、周波数 $f_1, (f_2)$ を割当て不可とする。

提案手法では、この貪欲アルゴリズムにより送信機に周波数を割り当てることを基本に、GA により最適な送信機への周波数の割当て順序を探索する。

3.3.2 GA による最適割当て順序の探索

GA を用いて最適な割当て順序を探索するのに、以下の設定を行った。

(a) 染色体表現

基地局に設置される送信機に 1 から n までの番号を付けたうえで、J. J. Gerefenstette らが巡回セールスマン問題 (TSP) を解くための順序表現 (Ordinal Representation) として採用したものと同様の形式で、チャンネルを割り当てていく送信機の順序を染色体として表現する。ここで n は管内全体で設置される送信機の総数を表し、一台の送信機には最大二つのチャンネルが割当て可能であるから、 $n = \sum_{i \in S} \lceil r_i/2 \rceil$ と計算される。

この染色体表現での i 番目の遺伝子は、 $i-1$ 番目までの遺伝子の情報に従った割当てが行われた時点で、次に周波数を割り当てる送信機が、未割当てリストの何番目の要素であるかを表している。未割当てリストとは、まだ周波数が割り当てられていない送信機の番号を付けたうえで、図 8 の染色体表現を採用した。ここで L_q, L_c はそれぞれ、基地局全体での最大クリークに含まれる基地局に設置される送信機の数、(全体の

5, 3, 1, 3, 1, 1) に対応する送信機の割当て順序を図 7 に示した。なお、図 7 の縦に並んだ数値列は、それぞれ

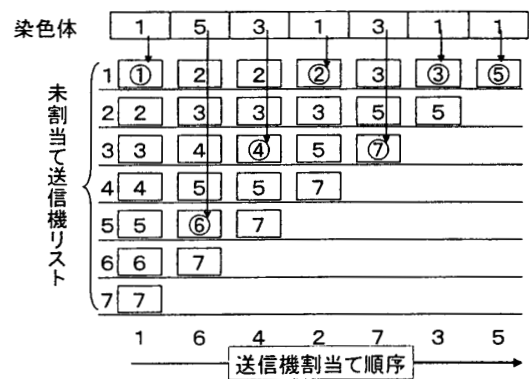


図 7: 染色体と送信機への割当て順序

の割当て時における未割当てリストを表している。

また、最大クリークに属する基地局間では、同一の周波数を利用することはできず、これらの基地局は干渉条件がもっとも厳しい (割当てが難しい) 局の集まりと考えることができる。そこで基地局全体を対象としたグラフと、干渉地域に位置する基地局のみを対象としたグラフの最大クリークをそれぞれ求め、(1) 全体での最大クリークに含まれる基地局に設置される送信機、(2) 干渉地域での最大クリークに含まれる基地局に設置される送信機、(3) その他の送信機の順に周波数が割り当てられるよう、送信機 i には表 5 のように番号を付けたうえで、図 8 の染色体表現を採用した。ここで L_q, L_c はそれぞれ、基地局全体での最大クリークに含まれる基地局に設置される送信機の数、(全体の

表 5: 送信機 i の番号付け

送信機 i の配置される基地局	送信機 i の番号
全体のクリークに含まれる基地局	$1 \leq i \leq L_q$
干渉地域のクリークに含まれる基地局	$L_q + 1 \leq i \leq L_q + L_c$
その他の基地局	$L_q + L_c + 1 \leq i \leq n$

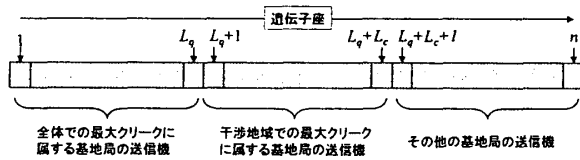


図 8: 染色体表現

最大クリークには含まれず) 干渉地域の基地局での最大クリークに含まれる基地局に設置される送信機の数
を表す。また、この時の図 8 の遺伝子座 j の対立遺伝子は表 6 のようになる。

表 6: 遺伝子座 j の対立遺伝子

遺伝子座 j	対立遺伝子
$j \leq L_q$	区間 $[1, L_q - j + 1]$ の整数
$L_q + 1 \leq j \leq L_q + L_c$	区間 $[1, L_c - j + 1]$ の整数
$j \geq L_q + L_c + 1$	区間 $[1, n - L_q - L_c - j + 1]$ の整数

(b) 個体の適応度

個体の適応度を $(f_s - \max_{i \in S} \bar{f}_i) + (f_c - \max_{i \in C} \bar{f}_i)$ で評価し、この値の大きな個体ほど優れた個体とする。ここで f_s は全局を対象としたグラフの最大クリークの位数を、 f_c は干渉地域の基地局のみを対象としたグラフの最大クリークの位数を表す。ここで f_s, f_c はそれぞれ、基地局全体と干渉地域とで最低限必要となるチャンネル数となるので、適応度 0 の割当ては理論的に見て最適な割当てとなる。また、スケールリング方式としてはシグマスケールリングを用いる。

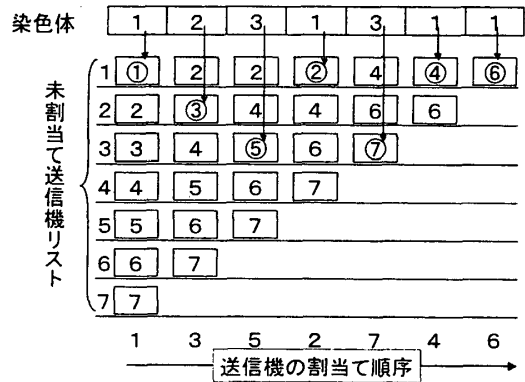


図 9: 突然変異による割当て順序の変化

(c) 遺伝的操作

上述の染色体に対し、突然変異率 0.05 の一様変異を加える。交叉の遺伝的操作は行わない。これは様々な突然変異率と交叉率の組合せに対して実際に割当てを行った結果から、もっとも探索効率が高い組合せを選択したものである。

ここでの効率的な解の探索に、交叉の遺伝的操作が必要とならない理由としては以下が考えられる。前述の染色体表現を用いた場合、ある一つの遺伝子の突然変異は、単にその遺伝子に対応した送信機の割当て順序だけでなく、それ以降の割当て順序にも影響する。たとえば染色体 (1, 5, 3, 1, 3, 1, 1) の 2 番目の遺伝子座の値が 5 から 2 に突然変異したとすると、送信機への割当て順序は 1, 6, 4, 2, 7, 3, 5 から、1, 3, 5, 2, 7, 4, 6 へと変化し、単に対応する遺伝子が突然変異した 2 番目に周波数を割り当てる送信機だけでなく、それ以降の送信機の割当て順序も変化する (図 9)。チャンネルを割り当てる送信機に優先順位を設けたここでの染色体では、正確には遺伝子座 i に生じた突然変異は、表 7 のように送信機の割当て順序に影響を与える。つまり、ここでの突然変異は、ある順番以降の割当て順序を部分的に並べ変える、一般的な二点交叉に似た変化を染色体に与える。ここで扱っている問題においてはこうした突然変異の遺伝的操作が、最適な送信機へのチャンネル割当て順序を効率的に探索するのに有効であるものと考えられる。

表 7: 突然変異により影響を受ける割当て順序

突然変異する遺伝子座 i	影響を受ける送信機の割当て順序
$i \leq L_q$	i 番目から L_q 番目までの割当て順序
$L_q + 1 \leq i \leq L_q + L_c$	i 番目から $L_q + L_c$ 番目までの割当て順序
$i \geq L_q + L_c + 1$	i 番目から n 番目までの割当て順序

表 8: 最適解を得るまでの世代数

平均	最小	最大
166.6	32	494

3.3.3 提案解法の枠組み

提案手法により周波数割当てを求める手順をまとめると、以下ようになる。

- (1) 最大クリークの計算：与えられた条件の下、すべての基地局を対象としたグラフの最大クリークと、干渉地域の基地局のみを対象としたグラフの最大クリークを求める。
- (2) 送信機数の算出：各基地局での必要チャンネル数に応じて、基地局で必要となる送信機数を算出するとともに、(1)で求めたクリークに基づき、表5にしたがい送信機を番号付けする。
- (3) GA の適用：GAにより最適な割当て順序を探索する。
 - (3-1) 初期化：初期集団として200個体をランダムに生成する。
 - (3-2) 適応度の計算：個体の染色体で表現された割当て順序にしたがい、前述の貪欲アルゴリズムによりチャンネルを割り当てる。そして、その結果に基づいて個体の適応度を計算する。
 - (3-3) 反復ループ：最適な（適応度0の）割当てが求まるか、あるいは500世代に達するまで以下を繰り返す。
 - (3-3-1) 新世代の生成：適応度の高い個体をルーレット選択により180個体抽出し、これらを新しい個体とする。
 - (3-3-2) 突然変異：新しい個体に対して、確率0.05で染色体中の遺伝子を他の対立遺伝子へと変化させる。

3.4 実問題への適用

提案アルゴリズムを用いて、実際に電力会社管内の基地局に対する周波数割当て案を求めた。

提案アルゴリズムを100回実行したところ、提案アルゴリズムによる100回の探索のうちの50回で、全基地局と干渉地域での帯域幅が最大クリークの位数と一致する、理論的に最適な割当て（大域的最適解）が求まった。また、最適な割当てが求まらなかった50ケースについては、干渉地域での利用周波数の帯域幅は最小となったものの、全体での利用帯域幅のチャンネル数が1だけ増えた。ここで、最適な割当てが得られた50ケースについて、最適な割当てを得るまでに要した世代数は表8のとおりである。200個体を500世代まで進化させるのに要する計算時間は、Pentium II 333MHzのパーソナルコンピュータで約260秒であるので、100回の実行中50回理論的に最適な割当てが求まったこの計算では、確率的には520秒以下の計算で理論的に最適な基地局への周波数割当てを求めることができたことになる。

4 むすび

本稿では電力用移動無線システムにおける二つの課題に対して検討を行った。第一に、各基地局で必要となるチャンネル数の算定方法について検討を行い、チャンネルの利用がピークとなる復旧作業時を対象に、規定時間内に復旧可能な箇所数から必要チャンネル数を算定する方法を提案した。第二に、利用周波数の帯域幅が最小となる、各基地局への最適な周波数割当てを求めるとして検討し、利用可能な周波数のうち、チャンネル番号が最小となるものから割り当てていく貪欲アルゴリズムを基本に、GAにより最適な割当て順序を探

索する新たな割当手法を提案した。

参考文献

- [1] K.I.Aardal, H.Hipolito, C.van Hoesel, B.Jansen, C.Ross and T. Terlaky, "Implementation and Testing of Polyhedral Techniques and Interior Point Methods", EUCLID CALMA Radio Link Frequency Assignment Project Report 2.2.1, 1995, <ftp://ftp.win.tue.nl/pub/techreports/CALMA/221.ps.gz>.
- [2] N. Funabiki and Y. Takefuji, "A neural network parallel algorithm for channel assignment problems in cellular radio networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.41, no.4, pp.430-437, Nov. 1992.
- [3] S. Hurley and D. H. Smith, "Fixed spectrum frequency assignment using natural algorithms," *Proc. of Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, pp.373-378, IEE, Sep. 1995.
- [4] D. Kuntz, "Channel assignment for cellular radio using neural networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.40, no.1, pp.188-193, Feb. 1991.
- [5] M. Cuppini, "A genetic algorithm for channel assignment problems," *Eur. Trans. Telecommun.*, vol.5, no.2, pp.285-294, Mar. 1994.
- [6] W. Crompton, S. Hurley, and N.M. Stephens, "Applying genetic algorithms to frequency assignment problems," *Proc. SPIE Conf., Neural and Stochastic Methods in Image and Signal Processing*, vol.2304, pp.76-84, Jul. 1994.
- [7] K. W. Lai and G. G. Coghill, "Channel assignment through evolutionary optimization," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.45, no.1, pp.91-96, Feb. 1996.
- [8] C. Y. Ngo and V. O. K. Li, "Fixed channel assignment in cellular radio networks using a modified genetic algorithm," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.47, no.1, pp.163-172, Feb. 1998.
- [9] 村上誉, 小川恭孝, 大鐘武雄: 遺伝的アルゴリズムを用いた移動通信におけるチャンネル割り当て法, 信学論 B, Vol.J83-B, No.6, pp.769-779, June 2000.
- [10] E. Gelenbe and I. Mitrani, "Analysis and Synthesis of Computer Systems", Academic Press Inc., 1980, 日本語訳「計算機システムの解析と設計」, オーム社, 秋丸 春夫, 橋田 温 監訳
- [11] D.P. Heyman and M.J. Sobel, "Handbooks in Operations Research and Management Science Vol. 2 STOCHASTIC MODEL", Elsevier Science Publishers, 1990, 日本語訳「確率モデルハンドブック」, 朝倉書店, 伊里 正夫, 今野 浩, 刀根 薫 監訳
- [12] R. Carraghan and R. M. Padalos, "An exact algorithm for the maximum clique problem," *Oper. Res. Lett.*, vol.9, no.6, pp.375-382, Nov. 1990.
- [13] 北野宏明 (編): 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 東京, Jun 1993.
- [14] 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎~GA の謎を解く~, オーム社, 東京, Sep. 1994.
- [15] 松井正一, 所健一: 割当順序表現を用いる遺伝的アルゴリズムによる移動無線における固定チャンネル割当ての高速解法, 信学論 B, Vol.J83-B, No.5, pp.645-653, May 2000.
- [16] C. Valenzuela, S. Hurley, and D. Smith, "A Permutation based algorithm for minimum span frequency assignment," *Proc. 5th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature - PPSN V*, pp 907-916, Sept. 1998.